



Titre: Etude de la filtration de moraines potentiellement suffosives
Title:

Auteur: Jean-Charles Dulau
Author:

Date: 1997

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dulau, J.-C. (1997). Etude de la filtration de moraines potentiellement suffosives [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/6715/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6715/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

NOTE TO USERS

The original manuscript received by UMI contains pages with slanted print. Pages were microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA FILTRATION
DE MORAINES POTENTIELLEMENT SUFFOSIVES

JEAN-CHARLES DULAU
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
DÉCEMBRE 1997



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33126-1

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DE LA FILTRATION
DE MORAINES POTENTIELLEMENT SUFFOSIVES

présenté par : DULAU Jean-Charles

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SILVESTRI Vincent, Ph.D., président

M. LAFLEUR Jean, Ph.D, membre et directeur de recherche

M. MLYNAREK Jacek, D.Sc, membre

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise est l'aboutissement de longues et laborieuses années d'études. Je n'aurais jamais pu accéder à ce titre sans l'aide de personnes motivées et déterminées. Je tiens à remercier tout particulièrement :

Monsieur Jean Lafleur, ing. Ph D., pour m'avoir permis de faire une maîtrise et de mener cette recherche jusqu'au bout.

Monsieur André Ducharme, technicien au laboratoire de géotechnique de l'École Polytechnique de Montréal, pour ses conseils avisés et son aide de tous les jours.

Monsieur Martin Bouthot, ing et étudiant au doctorat de géotechnique à l'École Polytechnique de Montréal, pour son aide et son soutien. J'ai grandement apprécié son ouverture d'esprit et son esprit d'analyse. Je le remercie aussi de m'avoir permis d'utiliser quelques uns de ses résultats pour compléter mon travail.

L'ensemble des étudiants du cycle supérieur de géotechnique de l'École Polytechnique de Montréal, et plus particulièrement Monsieur François Ferland, pour leur aide et leur soutien moral dans les moments difficiles.

Mesdemoiselles Caroline Baillé et Amandine Matrias et Monsieur Sébastien Demoetes,
pour leur soutien moral et logistique au moment délicat de la rédaction de ce mémoire.

RÉSUMÉ

L'étude du comportement interne des noyaux en moraine compactée de certains barrages de la Baie James a révélé des anomalies, notamment la concentration de pertes de charge à l'aval du noyau. Ces pertes de charge sont plus élevées que celles prévues par la théorie. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer ce phénomène.

On a supposé que les particules fines de la moraine (< 0.080 mm) migraient et colmataient le filtre, entraînant une augmentation et une concentration des charges hydrauliques à l'aval du noyau. Ce mémoire traite de la migration sur une distance appréciable de particules sous l'effet de forces d'écoulement, appelée suffosion. On veut déterminer à partir de quel pourcentage de fines la moraine devient suffosive et vérifier si la migration de particules est bien à l'origine de l'anomalie hydraulique.

Cette étude est la continuation de celle amorcée en 1995 par Loungnarath qui avait conclu que les moraines ayant plus de 19 % de fines étaient stables alors que celles ayant moins de 11 % de fines étaient potentiellement suffosives.

La méthode expérimentale utilisée est commune aux deux études. Elle consiste en plusieurs essais de percolation à l'intérieur d'un perméamètre à paroi rigide. Les échantillons de moraine ont été compactés à 95 % de la référence Proctor standard. Des capteurs de pression répartis le long du perméamètre permettent de suivre l'évolution des charges au sein des échantillons. Deux modifications majeures ont été apportées lors de cette étude. Le papier filtre situé à l'aval de l'échantillon de moraine a été remplacé

par un filtre granulaire. Un piston permettant de vaincre les forces de frottement entre l'échantillon et le perméamètre a été rajouté. L'essai terminé, l'échantillon est découpé en 4 tranches et le filtre en deux, pour ensuite être tamisés. Les analyses granulométriques permettent de suivre la migration des particules.

Les résultats obtenus ont montré que le dépôt 6 de LG4 est stable et ce, quelque soit son pourcentage de fines. De plus, aucune concentration de pertes de charge n'a été observée à l'interface moraine/filtre. Nous avons observé que l'utilisation d'un filtre grossier s'accompagne d'une pénétration de particules fines dans le filtre et d'une augmentation de la pente des pertes de charge de l'amont vers l'aval. On en a conclu que la suffosion n'était donc pas à l'origine de la concentration des pertes de charge à l'aval du noyau et qu'au contraire, il pouvait se créer un phénomène de pontage à l'interface moraine/filtre.

A la vue de ces résultats on a recommandé de rallonger le perméamètre, de rajouter une rangée de capteurs, d'utiliser un gradient hydraulique moins élevé et d'augmenter la durée des essais pour mieux appréhender le phénomène de pontage à l'interface moraine/filtre.

L'utilisation de théories relatives à la suffosion a montré que celle de Kenney et Lau permettait de prédire le comportement de la moraine.

ABSTRACT

Studies conducted on monitored dams located in the Bay James region have shown that compacted moraine cores were prone to head losses concentration downstream. The head losses measured were higher than those expected by theory. Consequently several hypotheses were given in order to explain this phenomenon. The authors assume that fine particles (smaller than 0.080 mm in diameter) are liable to migrate and eventually clog the filter, hence inducing a concentration and a rise in water head downstream of the core. This study analyses particle migration due to seepage in cores made of compacted moraine.

The purpose of this research is firstly, to determine the percentage of fine particles for which the moraine was suffosive and secondly, to verify that migration of fine particles is responsible for these hydraulic anomalies.

This research is a continuation of Loungnarath (1996) on the subject. It was concluded that moraine containing over than 19 % of fine particles were stable whereas those containing less than 11 % of fine particles were potentially suffosive.

Laboratory tests were conducted in the same manner as those by Loungnarath. Samples were compacted at 95 % Proctor standard. Pressure gauges installed alongside (from top to bottom) the permeameter were used to measure the evolution of water pressure inside the soil specimens. This research however, differs from the previous study because granular filters were used instead of paper filters downstream of the base soil

and the cell was equipped with a piston to overcome the existing friction between the soil and the permeameter. After each experiment, the base soil and the filter were respectively splitted into four and two slices which were subjected to a sieve analysis in order to quantify the particle migration.

Results showed that the moraine used for experiments is stable regardless of the percentage of fine paricles. In addition, no excessive head losses were noted at the moraine/filter interface. There was however, noticeable pentration of fine particles in the coarse filter, accompanied by an increasing slope of head losses in the downstream direction. Therefore, one can conclude that head losses concentration observed in moraine cores, do not emanate from suffosion and that bridging may occur near the base filter interface.

In light of these results, we recommand for further investigation, a longer permeameter, additionnal pressure gauges, lower hydraulic gradients and tests of longer duration, so that bridging can be detected.

The Kenney and Lau's theory could predict the moraine behavior.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES SYMBOLES	xix
LISTE DES ANNEXES	xx
AVANT PROPOS	xxiii
CHAPITRE 1.INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Conclusions et recommandations du rapport Loungnarath et Lafleur (1996)	3
1.3 Objectifs de la présente recherche et programme d’essais	6
1.4 Plan du rapport	7
CHAPITRE 2. SUFFOSION ET FILTRATION	9
2.1. Suffosion	9
2.1.1. Définition	9
2.1.2. Suffosion et filtration même phénomène?	10
2.1.3. Rappels théoriques sur la suffosion	112
2.1.4. Paramètres de suffosion	14
2.1.4.1. Paramètres géométriques	15
2.1.4.2. Paramètres hydrauliques	15

2.1.5. Théorie de Kenney et Lau	16
2.2 Filtration	18
2.2.1. Critères géométriques de Terzaghi	18
2.2.2. Critères de filtres selon Lafleur	19
CHAPITRE 3. LES SOLS	23
3.1. Les bases	23
3.1.1. Reconstitution des bases	23
3.1.2. Caractéristiques des bases	25
3.1.3. Potentiel suffosif des bases	26
3.2 Les filtres	32
3.2.1. Choix des granulométries des filtres granulaires	32
3.2.2. Caractéristiques des filtres	33
3.2.3. Vérifications des critères de Terzaghi	35
3.2.4. Vérifications des critères de Lafleur	36
CHAPITRE 4. METHODOLOGIE	37
4.1. Modélisation du problème	37
4.2. Description des montages	38
4.3.. Les cellules	39
4.4. Le piston	42
4.5. Calibration du montage	43
4.5.1. Pertes de charge dans les pierres poreuses	44
4.5.2. Pertes de charges dans les filtres granulaires	45

4.6. Mode opératoire	45
4.7. Procédures d'arrêt et de démontage d'un essai	46
4.8. Désignation des essais	48
4.9. Traitement des données	49
4.9.1. Les données	49
4.9.2. Etapes de calculs	49
CHAPITRE 5. TRAITEMENT DES DONNEES	51
5.1. Production de fines au compactage	51
5.2. Essais à 0 % de fines	52
5.2.1. Analyse de la percolation	53
5.2.2. Analyses granulométriques	54
5.2.3. Conclusions sur les essais à 0 % de fines	56
5.3. Essais à 12 % de fines	56
5.3.1. Analyse de la percolation	57
5.3.2. Analyses granulométriques	62
5.3.2.1. Les bases	62
5.3.2.2. Les filtres	66
5.3.3. Conclusions sur les essais à 12 % de fines	66
5.4. Essais à 6 % de fines	69
5.4.1. Analyse de la percolation	69
5.4.2. Analyses granulométriques	73
5.4.2.1. Les bases	73

5.4.2.2. Les filtres	73
5.4.3. Conclusions sur les essais à 6 % de fines	76
5.5. Limitations des résultats	76
5.5.1. Précision des capteurs et normalisation des charges pour $i = 10$	77
5.5.2. La géométrie des cellules	77
5.5.3. Le gradient	78
5.5.4. Prélèvement des échantillons	78
5.6. Recommandations	79
CHAPITRE 6. SYNTHESE DES RESULTATS	81
CHAPITRE 7. CONCLUSION	84
BIBLIOGRAPHIE	88
ANNEXE A : Résultats des essais faits sur le sol à 0 % de fines	94
ANNEXE B : Résultats des essais faits sur le sol à 12 % de fines	103
ANNEXE C: Résultats des essais faits sur le sol à 6 % de fines	124
ANNEXE D: Production de fines lors du compactage et lavage des moraines	141
D.1. Production de fines lors du compactage au marteau Proctor	141
D.1.1. Mode opératoire	142
D.1.2. Résultat	143
D.2. Lavage des moraines	144
D.2.1 Mode opératoire	145
D.2.2 Résultats	145

D.2.2.1. Etape A : lavage, tamisage à sec	145
D.2.2.2. Etape B : série de tamisages à sec, lavage	147
D.2.2.3. Conclusions	153
ANNEXE E: Etymologie et histoire du mot suffosion.	155

LISTE DES TABLEAUX

xv

Tableau 3.1	Résultats des essais de compactage sur les bases	25
Tableau 3.2	Potentiel suffosif des différentes bases selon Burenkova	31
Tableau 3.3	Diamètres diviseurs selon Burenkova pour les différentes bases	31
Tableau 3.4	Caractéristiques des filtres	33
Tableau 3.5	Critères géométriques de filtre selon Terzaghi	35
Tableau 3.6	Critères de filtre selon Lafleur	36
Tableau 4.1	Exemples de désignations d'essais	48
Tableau 4.2	Etapes et opérations du traitement de données	50
Tableau 5.1	Caractéristiques des sols mis en place	52
Tableau 5.2	Caractéristiques des sols mis en place	56
Tableau 5.3	Perméabilités locales finales enregistrées dans les tranches (en m/s)	60
Tableau 5.4	Caractéristiques des sols mis en place	69
Tableau 5.5	Perméabilités locales finales enregistrées dans les tranches (en m/s)	70
Tableau 6.1	Pourcentages de fines par tranches par tranche et par essai	81
Tableau 7.1	Synthèse des résultats	85

LISTE DES FIGURES

xvi

Figure 1.1	Anomalie dans le barrage de LG4	1
Figure 1.2	Perméamètre à paroi rigide	4
Figure 2.1	Calcul du diamètre maximum d'une constriction empêchant la suffosion	11
Figure 2.2	Relation de taille entre une particule et une constriction dans un sol	13
Figure 2.3	Théorie de Kenney et Lau	17
Figure 2.4	Résultats de la suffosion après filtration	21
Figure 2.5	Choix du diamètre indicatif d_I	22
Figure 3.1	Courbes granulométriques de la moraine naturelle et des bases	24
Figure 3.2	Courbes de compactage des bases	25
Figure 3.3	Potentiel suffosif de la base à 0% de fines selon Kenney et Lau	27
Figure 3.4	Potentiel suffosif de la base à 6% de fines selon Kenney et Lau	28
Figure 3.5	Potentiel suffosif de la base à 12% de fines selon Kenney et Lau	29
Figure 3.6	Potentiel suffosif de la moraine naturelle selon Kenney et Lau	30
Figure 3.7	Courbes granulométriques des filtres	34
Figure 4.1	Modélisation du problème	37
Figure 4.2	Montage d'essai de filtration	39
Figure 4.3	Cellule sans piston	40
Figure 4.4	Cellule avec piston	41

Figure 4.5	Pertes de charge dans les pierres poreuses en fonction du débit	44
Figure 4.6	Localisation des tranches, des pressions mesurées et des perméabilités locales, dans la cellule	47
Figure 5.1	Pertes de charge de l'essai S0-F1	53
Figure 5.2	Pertes de charge de l'essai S0-F3	54
Figure 5.3	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) des essais S0-F1 et S0-F3	55
Figure 5.4	Pertes de charge de l'essai S12-F3	59
Figure 5.5	Pertes de charge de l'essai PS12-F3	59
Figure 5.6	Pertes de charge de l'essai APS12-F3	60
Figure 5.7	Pertes de charge des essais S12-F1 (1 et 2)	61
Figure 5.8	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai AS12-F3	63
Figure 5.9	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) des essais S12-F1 (1 et 2)	64
Figure 5.10	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai S12-F3	65
Figure 5.11	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai PS12-F3	65
Figure 5.12	Excès ou déficit de paricules dans le filtre grossier	68

Figure 5.13	Excès ou déficit de particules dans le filtre fin	68
Figure 5.14	Pertes de charge de l'essai PS6-F3	71
Figure 5.15	Pertes de charge de l'essai PS6-F1	71
Figure 5.16	Pertes de charge de l'essai S6-F3	72
Figure 5.17	Pertes de charge de l'essai AS6-F3	72
Figure 5.18	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) des essais S6-F3 et AS6-F3	74
Figure 5.19	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai PS6-F3	75
Figure 5.20	Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai PS6-F1	75

LISTE DES SYMBOLES

xix

A	surface transversale à l'écoulement
d_d	diamètre diviseur
d_I	diamètre indicatif
d_i	diamètre correspondant à $i\%$ passant ($i=10,15,30,50,60,85,90,100$)
e	indice des vides
F_L	force latérale
g	accélération gravitationnelle
i	gradient
k	perméabilité
K_0	coefficient des terres au repos
O_F	ouverture de filtration
Q	débit
R_R	rapport de rétention
δ	angle de frottement base/paroi

Annexe A : Résultats des essais faits sur le sol à 0 % de fines	94
Figure A.1. Débit en fonction du temps pour l'essai S0-F1	95
Figure A.2. Débit en fonction du temps pour l'essai S0-F3	96
Figure A.3. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S0-F1	97
Figure A.4. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S0-F3	98
Figure A.5. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S0-F1	99
Figure A.6. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S0-F3	100
Figure A.7. Charges totales en fonction du temps pour l'essai S0-F1	101
Figure A.8. Charges totales en fonction du temps pour l'essai S0-F3	102
 Annexe B : Résultats des essais faits sur le sol à 12 % de fines	 103
Figure B.1. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)	104
Figure B.2. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)	105
Figure B.3. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F3	106
Figure B.4. Débit en fonction du temps pour l'essai PS12-F3	107
Figure B.5. Débit en fonction du temps pour l'essai APS12-F3	108
Figure B.6. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)	109
Figure B.7. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)	110
Figure B.8. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F3	111

Figure C.2. Débit en fonction du temps pour l'essai PS6-F3	126
Figure C.3. Débit en fonction du temps pour l'essai S6-F3	127
Figure C.4. Débit en fonction du temps pour l'essai AS6-F3	128
Figure C.5. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS6-F1	129
Figure C.6. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS6-F3	130
Figure C.7. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S6-F3	131
Figure C.8. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai AS6-F3	132
Figure C.9. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS6-F1	133
Figure C.10. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS6-F3	134
Figure C.11. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S6-F3	135
Figure C.12. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai AS6-F3	136
Figure C.13. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS6-F1	137
Figure C.14. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS6-F3	138
Figure C.15. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S6-F3	139
Figure C.16. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai AS6-F3	140

Figure B.9. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS12-F3 133	112
Figure B.10. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai APS12-F3	113
Figure B.11. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)	114
Figure B.12. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)	115
Figure B.13. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F3	116
Figure B.14. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS12-F3	117
Figure B.15. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai APS12-F3	118
Figure B.16. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)	119
Figure B.17. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)	120
Figure B.18. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F3	121
Figure B.19. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS12-F3	122
Figure B.20. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai APS12-F3	123
 Annexe C : Résultats des essais faits sur le sol à 6 % de fines	 124
Figure C.1. Débit en fonction du temps pour l'essai PS6-F1	125

AVANT PROPOS

Le sol est un milieu complexe constitué de trois phases: solide, liquide et gazeuse. Lorsque les mathématiques ont été appliquées aux sols pour l'étudier et en prévoir le comportement mécanique, les géotechniciens ont été confrontés à des problèmes dus à la diversité des sols et leur hétérogénéité. Les interactions entre les phases sont elles aussi pour la plupart malconnues, voire même inconnues. Elles accentuent la difficulté de l'étude du comportement des sols. Les théories qui ont été établies sont basées sur des cas simplifiés à l'extrême de façon à les rendre générales. La simplification des problèmes dus à la méconnaissance de certains mécanismes et à la complexité des sols ont amené les théoriciens à appliquer un facteur dit de sécurité, qui traduit l'incertitude des prédictions.

Tous les spécialistes s'accordent pour dire que la source de tous ces problèmes est la présence de l'eau dans le sol. Aujourd'hui encore, des études très poussées sont menées pour mieux comprendre des phénomènes jusque là inexpliqués. L'étude des sols partiellement saturés est un des exemples les plus représentatifs. C'est cette eau, contenue dans les noyaux de barrages du complexes LG4, qui a motivé cette recherche. La problématique est exposée plus en détail dans le chapitre 1.

Cette recherche est le deuxième volet d'une étude réalisée par le département de Génie Civil de l'École Polytechnique de Montréal sous la direction de Monsieur Jean Lafleur, pour l'Hydro-Québec.

Le premier volet de cette étude a été effectué par Mademoiselle Anne-Marie Lougnarath dans le cadre d'une maîtrise de recherche.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'analyse des mesures de comportement interne de certains barrages (Dascal, 1984, Stewart et al., 1990, Sierakowsky, 1994) a mis à jour des anomalies. L'une des principales anomalies est la concentration de pressions interstitielles élevées dans la partie aval du noyau de barrage. Le noyau a été réalisé en moraine compactée. Ces excès de pressions peuvent atteindre jusqu'à 55 m de colonne d'eau. (figure 1.1)

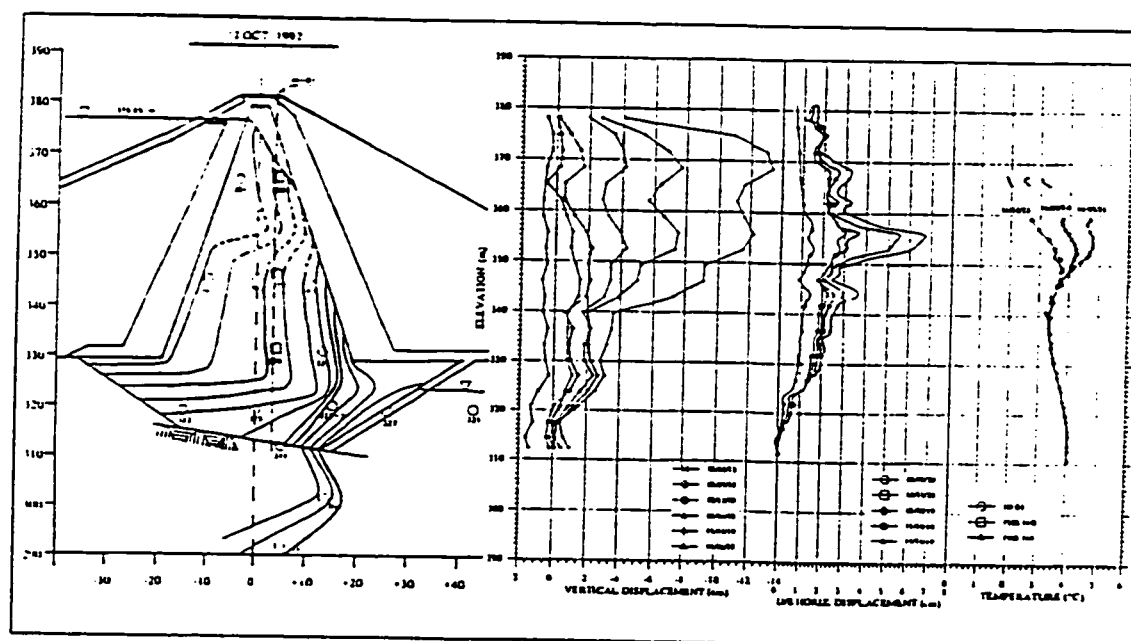


Figure 1.1 Anomalie dans le barrage de LG4 (Sierakowski 1994)

Trois hypothèses ont été proposées pour expliquer cette anomalie.

1- La migration de particules

Il s'agit d'un phénomène interne de masse. Les fines, sous l'effet d'un écoulement, se déplaceraient d'amont en aval du noyau à l'intérieur d'un squelette granulaire plus grossier. Cette migration créerait dans le noyau une zone amont plus perméable, obstruerait la zone amont et colmaterait le filtre.

2- L'air dissout

L'air est l'une des composantes des sols. Cet air peut être partiellement ou totalement dissout dans l'eau interstitielle. Mais lorsque la pression interstitielle d'eau n'est pas suffisante, l'air se détend et occupe alors une partie des pores du sol. Ceci a pour conséquence de diminuer le degré de saturation du sol ainsi que sa perméabilité.

3- La consolidation différentielle

Cette étude est basée sur l'hypothèse que la répartition de l'indice des vides « e » ne serait pas homogène au travers d'un noyau de barrage en moraine compactée. L'indice des vides décroîtrait de l'amont vers l'aval. Ce phénomène serait dû à la mise en eau des barrages qui crée une poussée horizontale sur l'ouvrage. Cette poussée mettrait la partie

amont du noyau en traction et la partie aval en compression. La partie amont serait donc plus perméable que la partie aval.

Les hypothèses 1 et 3 sont basées sur une hétérogénéité du coefficient de perméabilité du noyau de barrage. L'hypothèse 2 est basée sur une diminution du degrés de saturation.

1.2 Conclusions et recommandations du rapport Loungnarath et Lafleur (1996)

Le programme expérimental a comporté 11 essais de percolation à l'intérieur d'un perméamètre à paroi rigide (figure 1.2). Les expériences ont porté sur un sol reconstitué à partir d'une moraine de LG4 à des pourcentages de fines ($< 80 \mu\text{m}$) variant entre 4 et 28 %.

Les sols ont été compactés à une teneur en eau optimum et à 95 % de la référence Proctor standard. Une contre-pression de 600 kPa et un gradient de 10 ont été appliqués dans chaque essai. Cinq capteurs de pression répartis uniformément le long du perméamètre ont permis de suivre l'évolution des pressions dans les échantillons de sol. Après chaque essai, le sol a été découpé en cinq tranches pour fin d'analyses granulométriques. L'objectif était de vérifier le potentiel suffosif des sols étalés en le reliant à la variation des distributions de charges et aux résultats des analyses granulométriques.

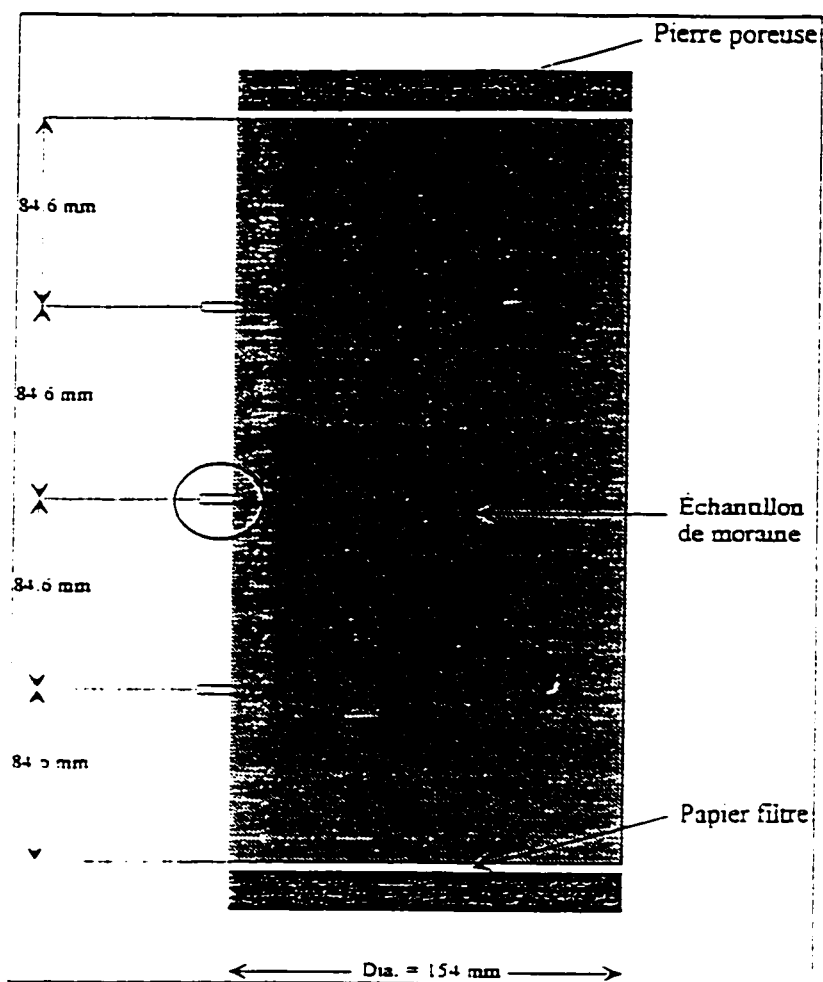


Figure 1.2 Perméamètre à paroi rigide (Loungnarath et Lafleur 1996)

Les résultats obtenus sont les suivants .

Pour les sols dont le pourcentage de fines était égal ou inférieur à 11 % :

- concentration des pertes de charge à l'aval ;
- les analyses granulométriques montrent une augmentation de fines dans la tranche la plus à l'aval : il y a suffosion .

Pour les sols dont le pourcentage de fines était supérieur ou égal à 19 % :

- pas de concentration des pertes de charge à l'aval ;
- il n'y a pas de suffosion.

En extrapolant ces résultats, on a conclu qu'il n'y avait pas de risque de suffosion dans la moraine de LG4 dont le pourcentage de fines est de 27 %.

Les recommandations qui ont découlé de ce rapport sont les suivantes :

- remplacement du papier filtre par un filtre granulaire. Il a été mis en évidence que le papier filtre favorise la création d'un cake côté aval et qu'il contrôle de surcroît l'écoulement, quelle que soit la perméabilité de l'échantillon étudié.
- ajout d'un capteur de pression dans le filtre granulaire pour mieux appréhender la répartition des pressions d'eau interstitielle, au cas où il y aurait migration de particules
- ajout d'un piston sur le haut de la cellule (côté amont). La fonction de ce piston est de garder la base en contact avec le filtre en cas d'érosion près de l'interface.

1.3 Objectifs de la présente recherche et programme d'essais

En admettant que le papier filtre ait joué un rôle majeur dans les conclusions du rapport précédent, l'objectif est de définir si la moraine de LG4 est suffosive .

Lors du programme d'essais, on a fait varier :

le pourcentage de fines des sols : 6 et 12 % ;

le sens de l'écoulement : vertical descendant et ascendant ;

la cellule avec ou sans piston.

1.4 Plan du rapport

Le présent chapitre est une introduction générale. La problématique et les objectifs de la recherche y ont été exposés. Les conclusions et les recommandations faites lors de la première partie de la recherche ont été rappelées.

Le chapitre deux est consacré aux théories de suffosion et de filtration. On verra que ces deux phénomènes sont très proches l'un de l'autre, et qu'ils sont basés sur la même relation géométrique. On définira le mot suffosion tel qu'il est employé dans ce rapport, et on étudiera son étymologie. Les bases théoriques de la suffosion et de la filtration seront rappelées. On s'intéressera de plus près aux théories de suffosion et de filtration qui ont servi dans cette recherche.

Les sols utilisés lors de cette recherche seront décrits dans le chapitre 3. Ce chapitre sera divisé en deux parties, l'une est consacrée aux bases, l'autre aux filtres. On verra comment on a reconstitué les bases à partir de la moraine de LG4. Les caractéristiques des bases seront précisées. On expliquera le choix des granulométries des filtres et on vérifiera les critères qu'ils ont à respecter.

Le chapitre quatre expose la méthodologie employée pour modéliser le problème. Les montages seront décrits. Les modifications apportées aux cellules seront signalées. Les étapes successives du traitement de données et les opérations réalisées y sont indiquées.

Le chapitre cinq présente les résultats des essais. Ces résultats sont présentés dans l'ordre suivant: 0%, 12% et 6% de fines

La synthèse des résultats sera faite dans le chapitre six. Les résultats seront interprétés.

On conclura dans le chapitre sept.

L'ensemble des figures relatives aux essais, qui n'ont pas été insérées dans le texte, sont regroupées dans les annexes A, B et C. L'annexe D présente une étude complémentaire sur la production de fines lors du compactage de la moraine. On précisera aussi l'importance du lavage de la moraine lors de la reconstitution des bases. L'étymologie et l'histoire du mot suffosion sont présentées dans l'annexe E.

CHAPITRE 2

SUFFOSION ET FILTRATION

2.1 Suffosion

2.1.1 Définition

L'étude amorcée entre l'Hydro-Québec et l'Ecole Polytechnique, porte sur la migration de particules fines de sol à l'intérieur d'un squelette granulaire sous l'effet d'un écoulement d'eau. Ce phénomène sommairement décrit dans Schuler (1995), est appelé selon les différents auteurs, « suffusion » (Kovacs), « suffosion » (DVWK), « sufosion » (Lorincz), « suffosion » (Ziems). Donc l'incertitude qui entoure la définition du mot suffosion (ou autres orthographes) se traduit par la confusion qui règne sur son orthographe. L'annexe E présente une étude plus poussée sur l'étymologie et l'histoire de la suffosion.

La suffosion telle que nous la nommerons et l'étudierons dans ce mémoire est définie comme suit :

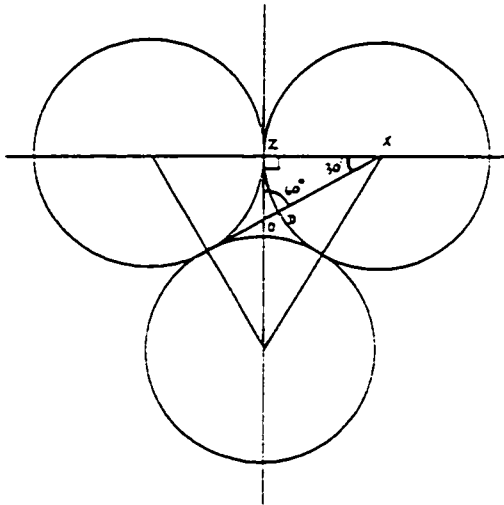
« Il s'agit du réarrangement et du transport des particules fines d'un sol à l'intérieur du squelette constitué par sa fraction la plus grossière, sous l'effet de forces d'écoulement ».

Cette définition, proposée par Ziemns et reprise par Schuler (1995), décrit parfaitement le sujet qui nous intéresse.

2.1.2 Suffosion et filtration, même phénomène ?

Pour la plupart des géotechniciens la suffosion est un phénomène mal connu, contrairement à la filtration qui fait partie des bases fondamentales de la géotechnique. Rares sont ceux qui associent la suffosion et la filtration. Seules les personnes qui s'intéressent à la migration des particules font la relation entre les deux phénomènes. En fait, la suffosion n'est qu'une variante du critère de rétention des filtres. Les filtres, comme le souligne Kovacs (1991), ont pour vocation de drainer ou de protéger les sols adjacents appelés bases. Pour ce faire, il faut qu'ils soient plus perméables que la base, pour dissiper les forces d'écoulement qui pourraient éroder la base, et qu'ils retiennent les particules de la base. La suffosion définit la migration de particules fines d'un sol dans un squelette constitué par la fraction grossière du sol, sous l'effet de forces d'écoulement. Lorsqu'il y a migration, le sol est dit suffosif ou instable, ce qui entraîne des modifications dans les comportements mécanique et hydraulique du sol.

Si dans un cas, on ne veut pas que les particules rentrent dans le filtre, dans l'autre on espère qu'elles ne bougeront pas à l'intérieur du sol. Ces deux phénomènes sont régis par la même relation géométrique. Pour qu'une particule ne se déplace pas, il faut que la taille des constriction soit inférieure à celle de la particule susceptible de bouger. On démontre facilement que la taille des constriction doit être inférieure ou égale à 6.5 fois le diamètre des particules à protéger (figure 2.1). On suppose que les particules sont uniformes et circulaires.



Dans le triangle OZX :

$$\frac{OZ}{\sin 30^\circ} = \frac{OX}{\sin 90^\circ} = \frac{XZ}{\sin 60^\circ}$$

$$OX = \frac{XZ \cdot \sin 90^\circ}{\sin 60^\circ} = \frac{r}{\sin 60^\circ} = \frac{r}{\frac{\sqrt{3}}{2}}$$

$$OX = \frac{2r}{\sqrt{3}}$$

on a donc :

$$OD = OX - r = \frac{2r}{\sqrt{3}} - r$$

$$OD = r \cdot \left(\frac{2 - \sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$OD \approx 0.155r$$

il faut :

$$r_F \leq 6.5 r_B$$

Figure 2.1 Calcul du diamètre maximum d'une constriction empêchant la suffosion

La suffosion a été abordée par Loebotskov pour la première fois en Russie dans les années trente. Depuis, plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce phénomène et ont proposé des théories et des méthodes permettant de prédire l'instabilité des sols.

Certains ne parlent pas de suffosion mais d'auto-filtration qu'ils définissent comme la capacité d'un sol à s'auto-filtrer. Ils considèrent que le sol est constitué de deux parties: un squelette continu formé par la fraction la plus grossière et une partie mobile formée par la fraction fine. La fraction grossière est alors assimilée au filtre et la fraction fine à la base.

Les théories édictées pour les filtres sont souvent basées sur l'expérience, et les relations, souvent empiriques. Les plus connues sont celles de Terzaghi qui compare plusieurs diamètres indicatifs de la base avec ceux du filtre. Certains rapports doivent être respectés pour que le filtre soit efficace. Ces relations sont présentées plus loin.

2.1.3 Rappels théoriques sur la suffosion

Dans son article de 1995, Schuler fait la synthèse de toutes les théories relatives à la suffosion. Il montre que des chercheurs comme Kezdi, De Mello ou Wittman se sont basés sur les critères de filtre pour prédire la suffosion. Mais ces critères sont limitatifs. En effet, pour un filtre la situation est claire: si le diamètre de la particule est supérieur à celui de la constriction, la base est protégée. Pour l'étude de la stabilité interne, le problème est plus complexe car les particules à protéger font partie du sol. Si une

particule est plus grosse qu'une constriction elle ne peut bouger, elle fait partie du squelette et la constriction considérée de fait n'existe plus.

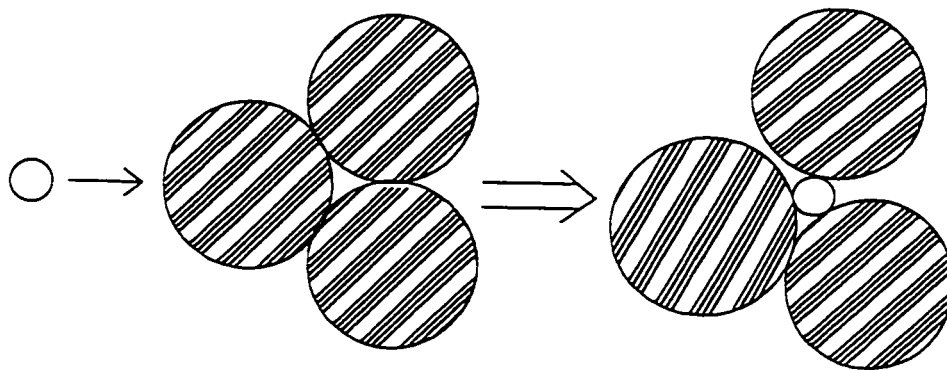


Figure 2.2 Relation de taille entre une particule et une constriction dans un sol

C'est à ce niveau que la théorie de Kenney et Lau (1985) est supérieure aux autres. Le principe de base reste toujours le rapport entre le diamètre des particules et la taille des constrictions. Après de nombreux essais sur des filtres, Kenney et Lau ont établi qu'une particule est susceptible de passer au-travers d'une constriction formée par des particules de diamètre quatre fois plus grand, ou plus. Ce résultat est inférieur à celui du calcul géométrique et aux indications de Holtz et Kovacs (1991). Ces derniers soulignent qu'un filtre uniforme dont la granulométrie est dix fois supérieure à celle d'un sol empêche la migration des particules.

La différence entre la théorie de Kenney et Lau et les autres, est la prise en compte de la forme de la courbe. Ils mettent en évidence qu'un déficit de particules entre une fraction de diamètre d et une fraction de diamètre $4d$ est la cause de la migration de particules. Ce déficit ne permet pas une distribution continue des tailles de constrictions et empêche les particules plus petites d'être bloquées par le squelette. La distribution granulométrique du sol prend ici toute son importance. Ce paramètre n'est pas pris en compte par l'ensemble des méthodes basées sur les critères de filtres. Ces méthodes ne tiennent compte que de certains rapports entre des diamètres dit indicatifs. La forme de la courbe granulométrique du sol entre ces diamètres n'est pas prise en compte. S'il existe une discontinuité ou un déficit important d'une fraction, cela n'intervient pas dans la prédiction de la stabilité du sol.

L'étude du potentiel suffosif d'un sol doit tenir compte de plusieurs paramètres. Ces paramètres sont énumérés dans la section suivante.

2.1.4 Paramètres de suffosion

Plusieurs paramètres interviennent dans la suffosion:

- les paramètres géométriques
- les paramètres hydrauliques

2.1.4.1 Paramètres géométriques

Il s'agit de :

- la taille des particules de sol (granulométrie)
- la répartition des différentes tailles de particules (courbe granulométrique)
- la densité du sol en place

La migration de particules ne sera possible que si le sol contient des particules libres de se déplacer et que les constrictionnements formés par le restant des particules du sol soient plus grandes que ces premières.

2.1.4.2 Paramètres hydrauliques

Il s'agit de:

- forces d'écoulement
- le sens de l'écoulement
- la perméabilité du sol. Ce paramètre est directement lié aux paramètres géométriques du sol.

Les forces d'écoulement doivent être capables de transporter des particules. Ces forces sont régies par les gradients au coeur du sol mais aussi par la perméabilité du sol..

2.1.5 Théorie de Kenney et Lau (1985)

Les théories de Kenney et Lau (1985) est la plus adaptée pour le type de granulométrie de sol étudié ici.

Le critère de base est la relation entre le diamètre des particules et la taille des constriction, et la répartition granulométrique des particules.

A partir de cette relation, ils construit un graphique $H=f(F)$ où F est le pourcentage de masse de particules passant un diamètre D , et H le pourcentage de masse compris entre D et $4D$.

Les valeurs de H et D découlent de la courbe granulométrique du sol étudié. (Figure 2.3)

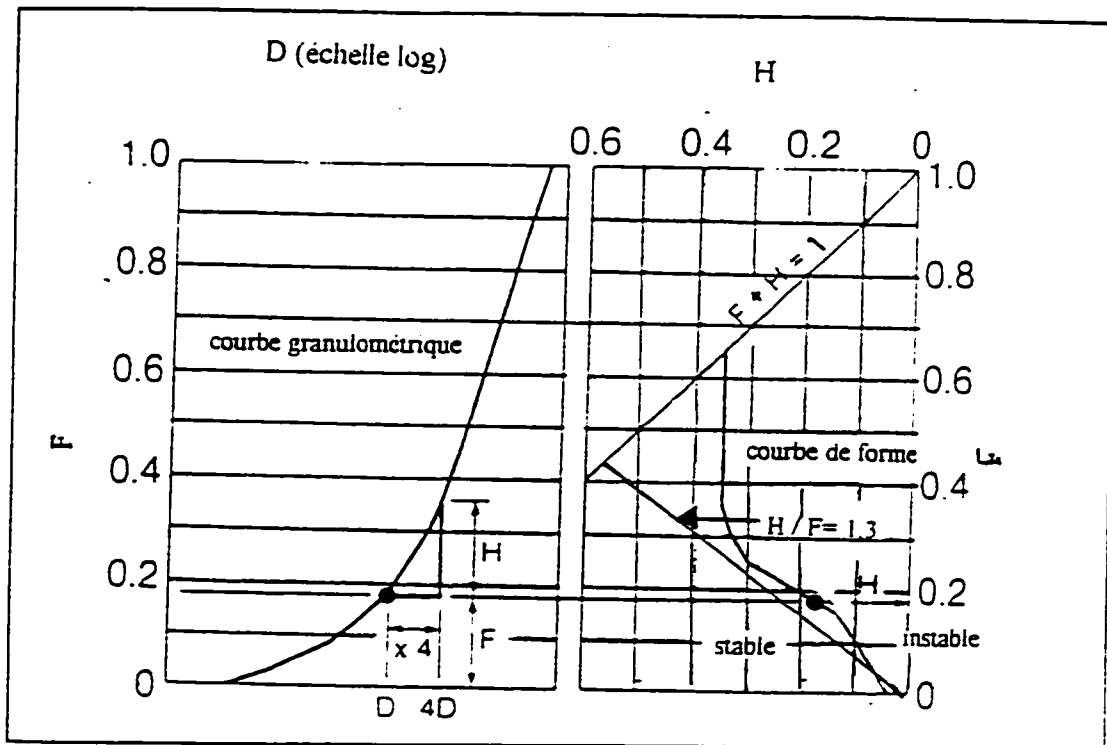


Figure 2.3 Théorie de Kennev et Lau (1985)

Cette théorie a été établie en comparant des sols stables et des sols instables, ce qui permet de localiser la frontière entre les domaines stables et instables du graphique. S'appuyant sur les travaux de Loebotskov, ils ont établi que le domaine de stabilité était délimité par la droite $H=1,3 \cdot F$ et une valeur de F comprise entre 0 et 20% pour un sol étalé.

La droite $F+H=1$ représente la fin de la fraction grossière des sols. Tous les points des courbes granulométriques des sols étudiés représentant la fin de la portion grossière tombent sur cette droite.

2.2 Filtration

2.2.1 Critères géométriques de Terzaghi

En 1922, Terzaghi a établi empiriquement pour des sols à granulométrie uniforme quelques critères applicables aux filtres en fonction des matériaux à protéger. Les deux principaux critères sont les suivants:

- 1- Les vides du filtre devront être suffisamment petits pour empêcher les particules de la base d'y pénétrer, de le colmater et d'entraver son bon fonctionnement (critère de rétention).
- 2- Le matériau composant le filtre doit être plus perméable que le matériau à protéger (base) pour empêcher tout excès de pression hydraulique susceptible de mettre en danger la stabilité interne du filtre et l'intégrité des structures avoisinantes (critères de perméabilité).

Les critères granulométriques pour le choix des filtres sont

$$\frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 5$$

$$\frac{d_{15}}{D_{15}} \leq 20$$

$$\frac{d_{50}}{D_{50}} \leq 25$$

Où

- d_i indique les diamètres du matériau filtrant
- D_i indique les diamètres du matériau à protéger

2.2.2 Critères de filtre de Lafleur

Les critères de filtres développés par Lafleur, Eichenauer et Werner (1996) nous permettent de tenir compte des risques de suffosion. Ces critères sont basés sur un

rapport de rétention (R_R) entre le diamètre indicatif (d_i) de la base et l'ouverture de filtration du filtre (O_F).

$$R_R = \frac{O_F}{d_i}$$

Selon la valeur de R_R obtenue, trois comportements sont décrits sur la figure 2.4.

- $R_R \gg 1$: lessivage complet (Pi: piping). Le sol est lavé de toutes ses particules fines. Le diamètre indicatif est très petit par rapport à l'ouverture de filtration. La perméabilité de la base augmente.
- $R_R \cong 1$: pontage (Br: bridging). L'ouverture de filtration et le diamètre indicatif sont du même ordre de grandeur. Seule la tranche de sol immédiatement au-dessus du filtre sera lavée de ses fines. Il se crée un phénomène de pontage. La perméabilité locale de cette tranche augmente.
- $R_R \ll 1$: colmatage externe (Bl: blinding). Les fines de la base ont migré sous l'effet des forces d'écoulement. L'ouverture de filtration étant beaucoup plus petite que le diamètre indicatif de la base, les fines sont retenues à l'interface base/filtre et créent un cake. Ce cake entraîne une diminution de la perméabilité de la base aux abords du filtre.

Le diagramme (fig 2.5) s'applique aussi bien aux filtres granulaires qu'aux filtres géosynthétiques. Pour ces derniers $O_F = O_{95}$, obtenu par tamisage hydrodynamique.

Pour un filtre granulaire: $O_F = d_{15}/9$. Un organigramme permet selon les caractéristiques intrinsèques de la base de choisir le diamètre indicatif.

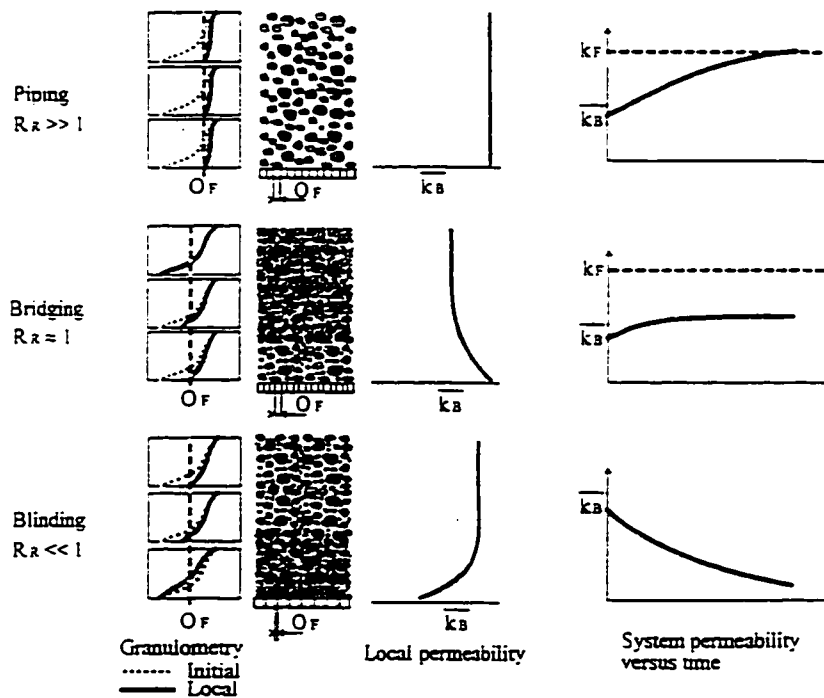


Figure 2.4 Résultats de la suffosion après filtration (Lafleur et al 1996)

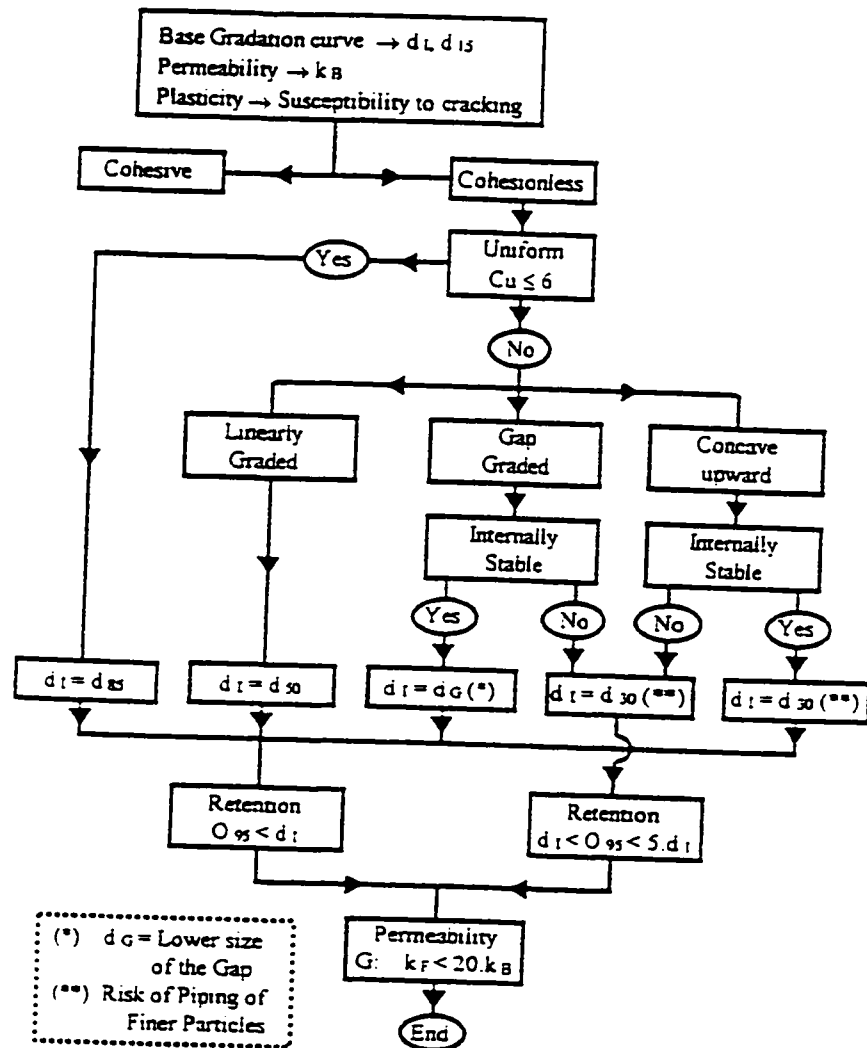


Figure 2.5 Choix du diamètre indicatif d_i (Lafleur et al 1996)

CHAPITRE 3

LES SOLS

Comme on l'a vu dans l'introduction le premier objectif de cette étude est de déterminer si la moraine de LG4 est suffosive. Si elle l'est, on doit déterminer à partir de quel pourcentage de fines elle devient instable. Il a fallu pour cela reconstituer des mélanges à différentes teneurs de fines. On rappelle que les particules considérées comme des fines sont les particules dont le diamètre est inférieur à 80 μm .

Le papier filtre est remplacé par un filtre granulaire. On a utilisé deux filtres dont les caractéristiques sont précisées dans ce chapitre.

3.1 Les bases

3.1.1 Reconstitution des bases

On a étudié des bases contenant 0, 6 et 12% de fines. Les différentes bases ont été reconstituées à partir de la moraine naturelle du dépôt 6 de LG4. Les caractéristiques granulométriques des bases et de la moraine naturelle sont présentées sur la figure 3.1.

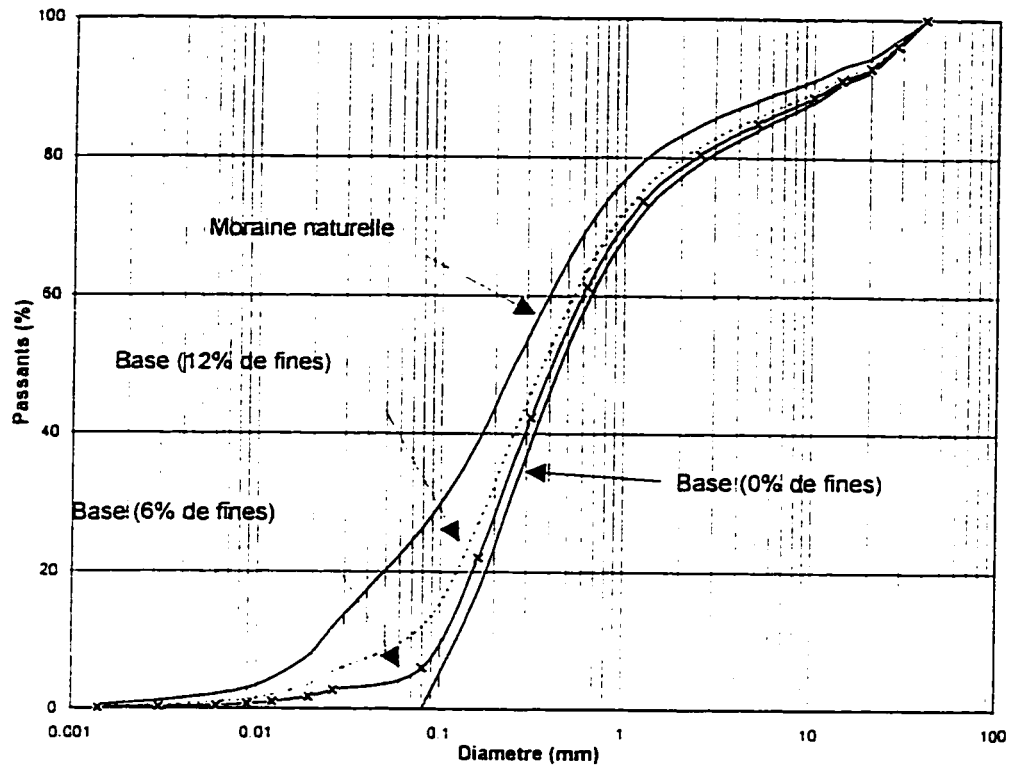


Figure 3.1 Courbes granulométriques de la moraine naturelle et des bases

Mode opératoire

- la moraine naturelle est lavée sur le tamis 80 μm .
- les parties grossières et fines sont récupérées et séchées
- la partie grossière est tamisée à sec pour séparer les fines restantes qui sont agglomérées ou collées à des particules grossières
- les bases sont reconstituées selon le pourcentage de fines choisi.

3.1.2 Caractéristiques des bases

La mise en place des bases dans la cellule est effectuée à l'aide d'un marteau Proctor standard. On a déterminé pour chacune des bases la référence Proctor standard :

Tableau 3.1 Résultats des essais de compactage sur les sols

Bases	Densité sèche max $\rho_d \text{ max (kg/m}^3\text{)}$	Teneur en eau optimum $W_{\text{opt}} (\%)$
0 % de fines	1960	6.0
6 % de fines	2010	6.3
12 % de fines	2043	6.7

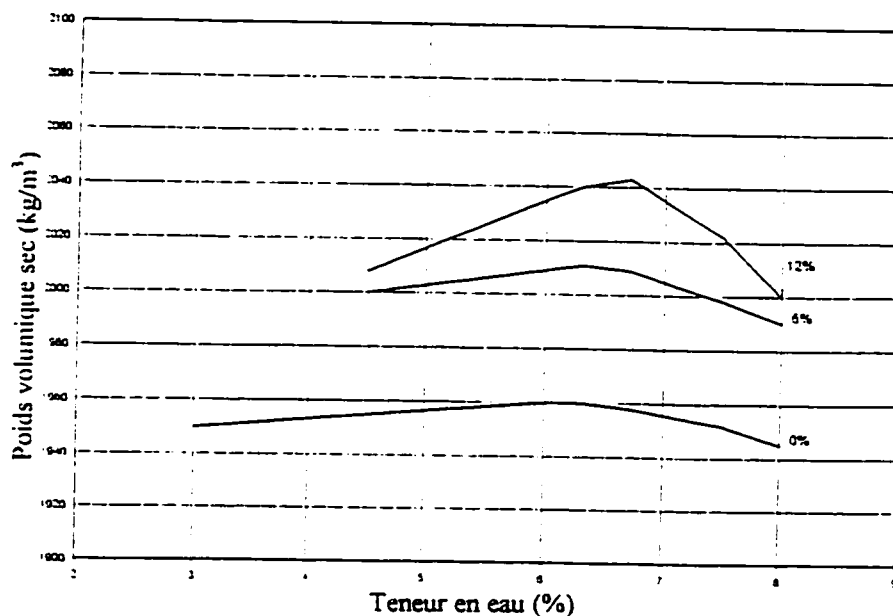


Figure 3.2 Courbes de compactage des bases

3.1.3 Potentiel suffosif des bases

Kenney et Lau (1985)

Ces auteurs ont proposé une méthode pour évaluer le potentiel suffosif des sols. Ils supposent que les particules au sein d'un sol se déplacent sur une distance appréciable. Les résultats sont présentés sur les figures 3.3, 3.4, 3.5, 3.6. On observe qu'aucune base n'est potentiellement suffosive.

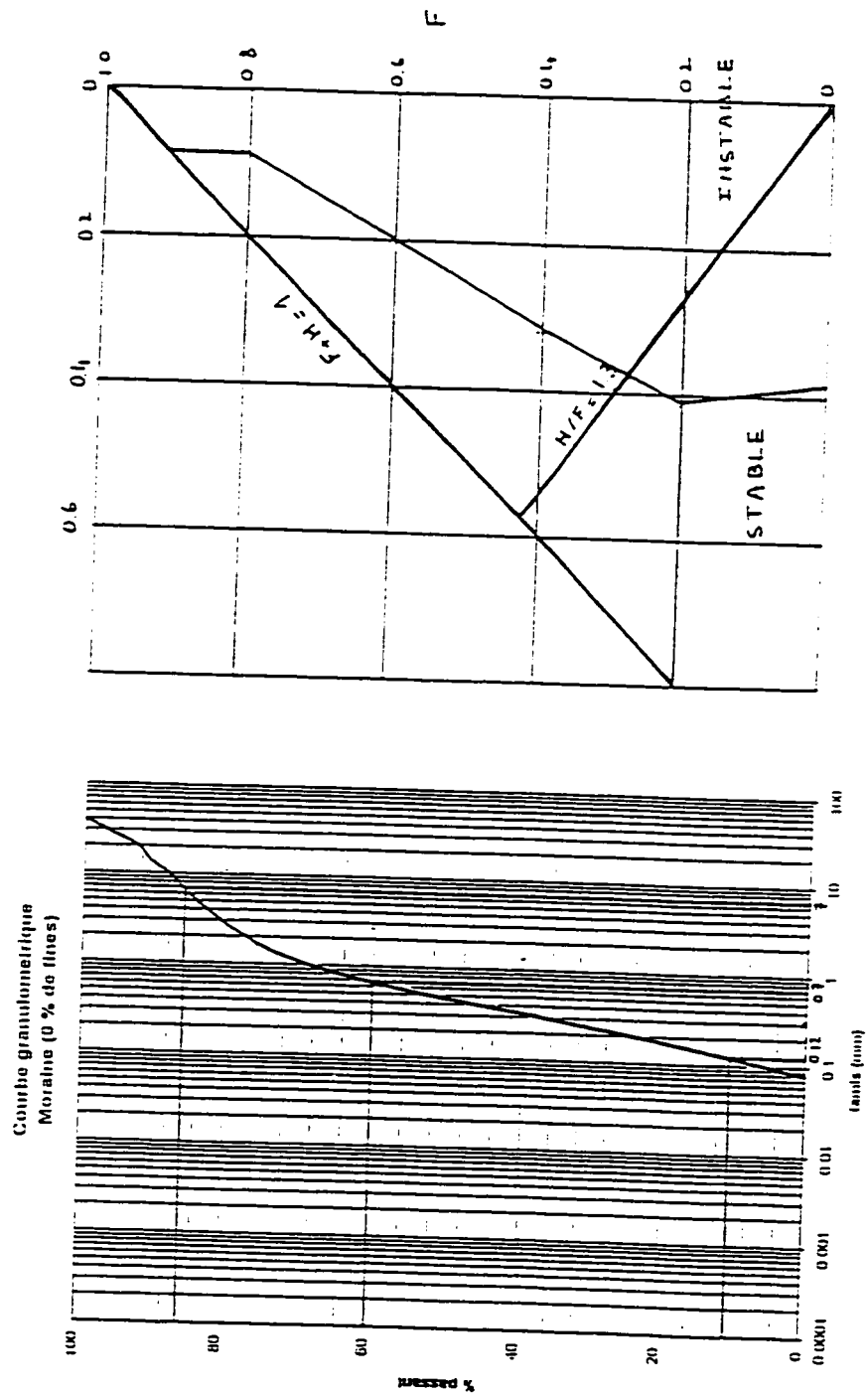


Figure 3.3 Potentiel suffosif de la base à 0 % de fines selon Kennev et Lau

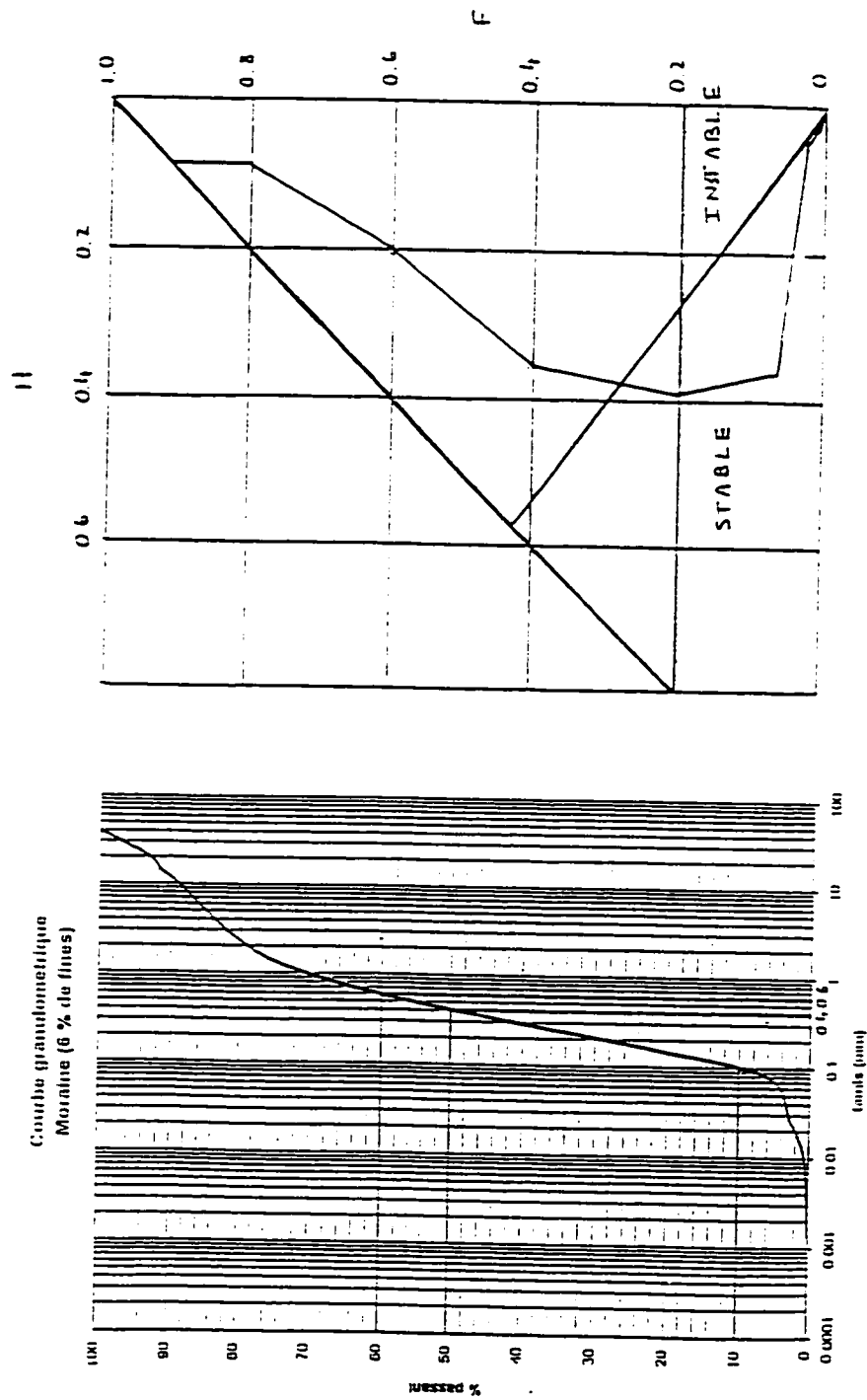


Figure 3.4 Potentiel suffosif de la base à 6 % de fines selon Kenney et Lau

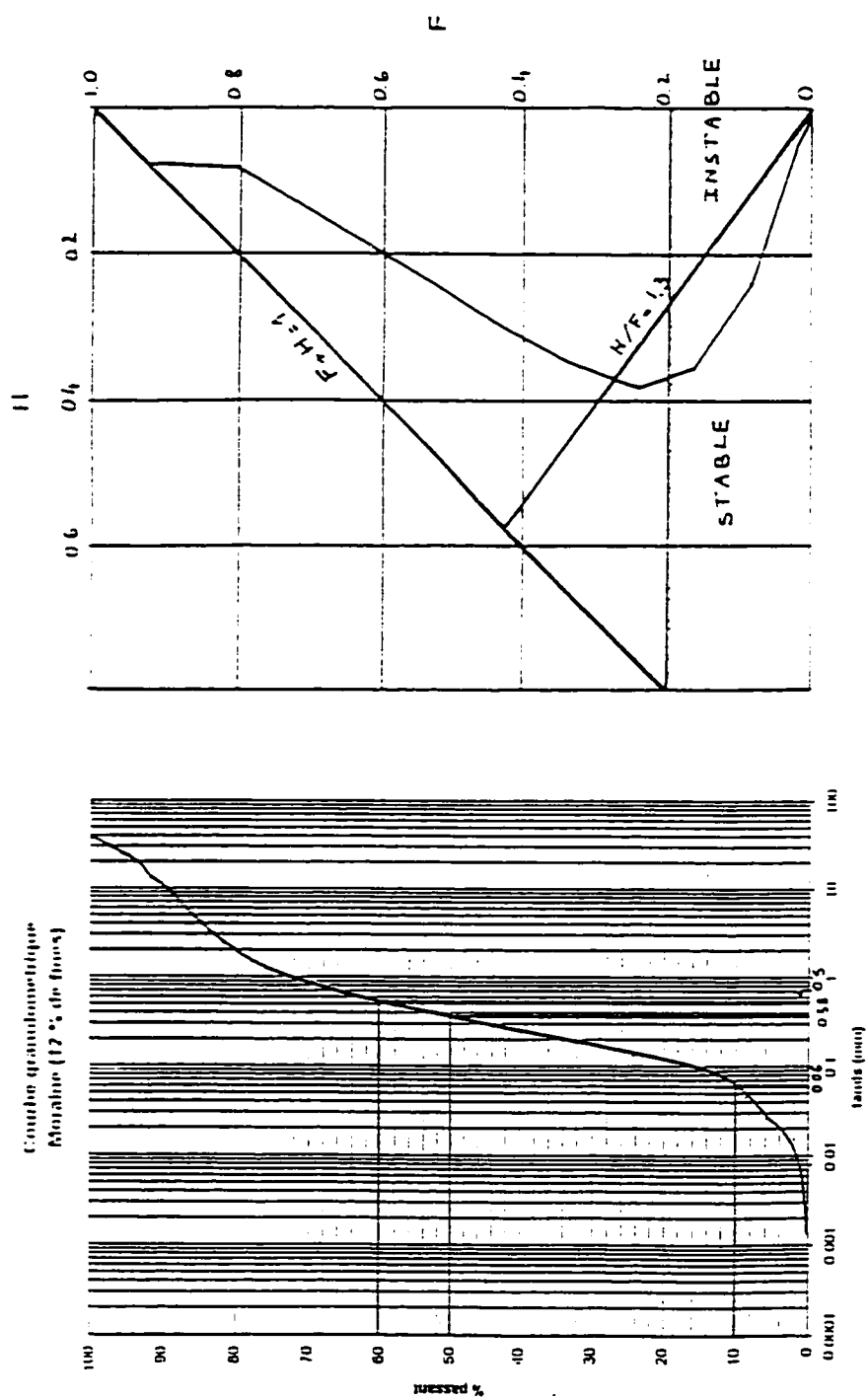


Figure 3.5 Potentiel suffosif de la base à 12 % de fines selon Kenney et Lau

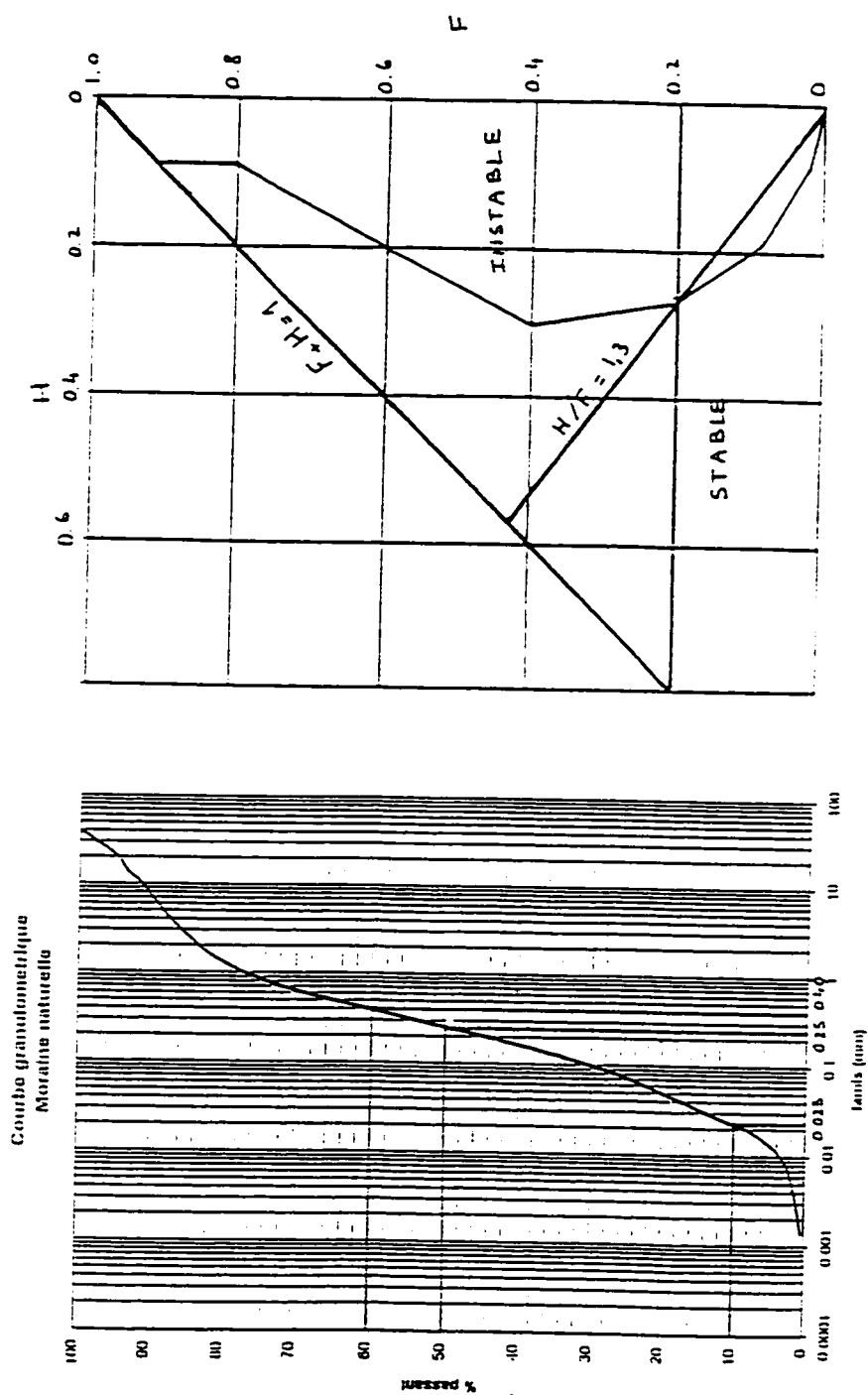


Figure 3.6 Potentiel suffosif de la moraine naturelle selon Kenney et Lau

Burenkova (1993)

Tous les mélanges étant potentiellement suffosifs comme on le voit dans le tableau 3.2 nous calculons alors le diamètre diviseur d_d (tableau 3.3).

Tableau 3.2 Potentiel suffosif des différentes bases selon Burenkova

% fines	d_{15} mm	d_{60} mm	d_{90} mm	$0,76 \cdot \log\left(\frac{d_{90}}{d_{15}}\right) + 1$	d_{90} d_{60}	$1,86 \cdot \log\left(\frac{d_{90}}{d_{15}}\right) + 1$	Potentiel suffosif
Moraine naturelle	0.031	0.4	7	2.79	17.5	5.38	Oui
0%	0.16	0.7	12	2.43	17	4.49	Oui
6%	0.12	0.6	11	2.49	18	4.65	Oui
12%	0.1	0.5	10	2.52	20	4.72	Oui

Tableau 3.3 Diamètres diviseurs selon Burenkova pour les différentes bases

% de fines	$d_{d \text{ min}}$	$d_{d \text{ max}}$
Moraine naturelle	0.32	1
0 %	0.32	1.04
6 %	0.28	0.96
12 %	0.24	0.84

On constate que les deux théories donnent des résultats opposés. Pour Kenney et Lau, toutes les bases sont stables alors que pour Burenkova, elles sont toutes potentiellement suffosives.

3.2 Les filtres

Plusieurs essais réalisés dans la première phase (Loungnarath et Lafleur 1996) ont montré que lors de migration de particules un cake se formait sur le papier. Les perméabilités locales, le débit et la répartition des pressions d'eau interstitielles étaient alors contrôlés par ce cake. La présence d'un filtre granulaire va permettre une meilleure appréciation des phénomènes puisqu'elle recrée les conditions réelles. Cela permettra aussi d'étudier l'interaction base/ filtre en cas de suffosion.

3.2.1 Choix des granulométries des filtres granulaires.

On s'est basé sur le fuseau contenu dans le rapport d'exécution conforme de la SEBJ pour la construction du complexe LG4. Deux filtres ont été choisis (voir figure 3.7). Ces filtres ont été choisis pour recréer des situations de filtration différentes. On a convenu de filtres ayant des coefficients de perméabilité différents d'un ordre de grandeur. Pour avoir une perméabilité homogène, on a considéré que les filtres devaient avoir une granulométrie peu étalée et un C_u de trois a été adopté. Ce faible coefficient d'uniformité permet d'obtenir des constriction de taille uniforme. Cela implique que les courbes

granulométriques des filtres ne sont pas contenues dans le fuseau spécifié mais leurs D_{15} correspondent à ceux de la frontière grossière (F3) et de la frontière fine du fuseau (F1). Les masses volumiques et les coefficients de perméabilité sont donnés dans le tableau 3.4.

Ces filtres doivent respecter les critères géométriques de filtres de Terzaghi.

3.2.2 Caractéristiques des filtres

Tableau 3.4 Caractéristiques des filtres

	ρ_d (kg/m ³)	k (m/s) *
F 1	1750 +/- 15	$2.84 * 10^{-4}$
F 3	1671 +/- 15	$4.85 * 10^{-3}$

* mesuré par essais à charge constante comportant différents gradients.

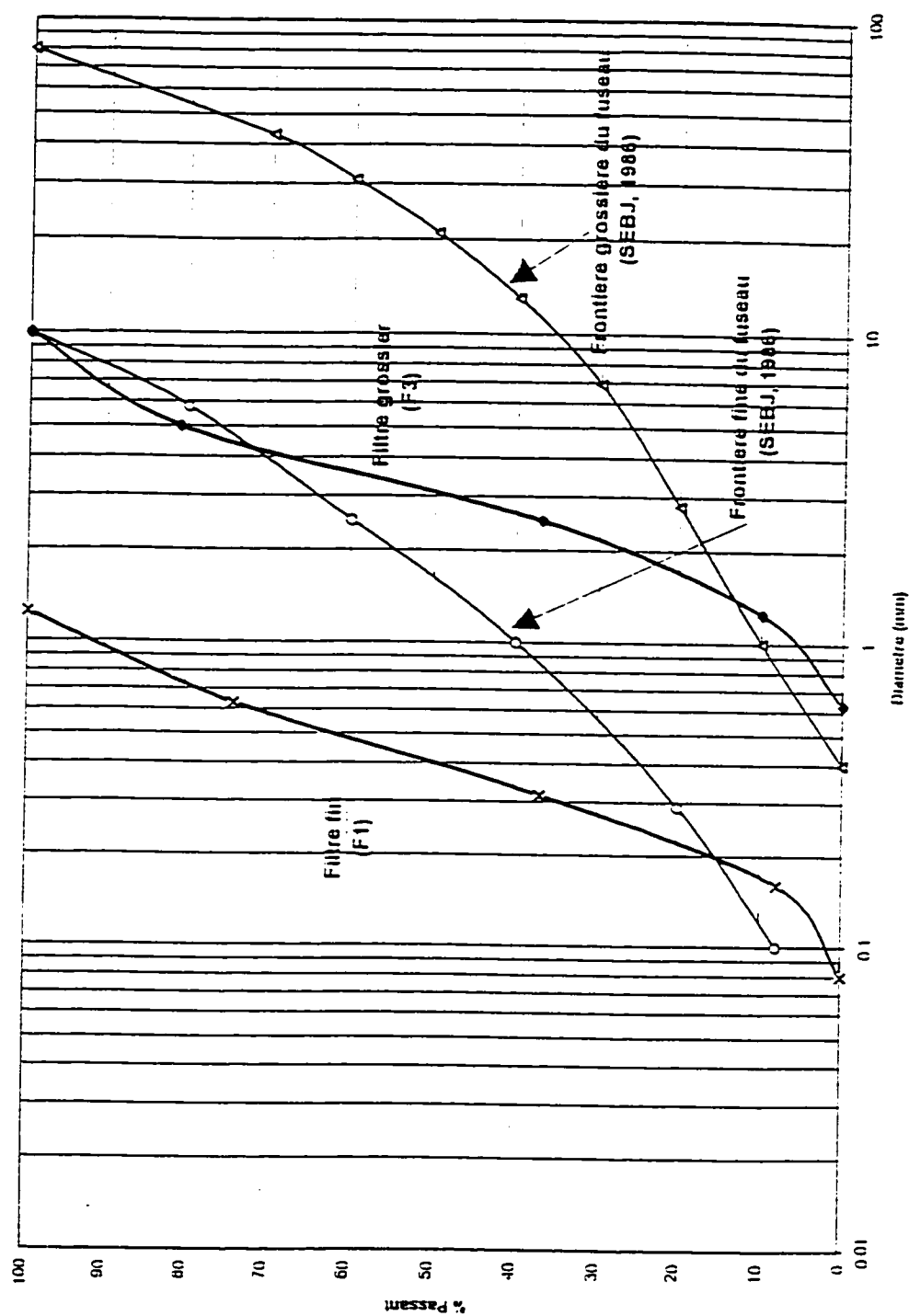


Figure 3.7 Courbes granulométriques des filtres

3.2.3 Vérification des critères de Terzaghi

Tableau 3.5 Critères géométriques de filtre selon Terzaghi

Mélanges	Filtre Critères	Filtre 1	Filtre 3
0% de fines	$\frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 5$	0.03	0.25
	$\frac{d_{50}}{D_{50}} \leq 25$	12	12
	$\frac{d_{15}}{D_{15}} \leq 20$	1.18	9.4
6% de fines	$\frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 5$	0.005	0.4
	$\frac{d_{50}}{D_{50}} \leq 25$	0.8	7.8
	$\frac{d_{15}}{D_{15}} \leq 20$	1.7	13
12% de fines	$\frac{d_{15}}{D_{85}} \leq 5$	0.06	0.52
	$\frac{d_{50}}{D_{50}} \leq 25$	9.5	9.5
	$\frac{d_{15}}{D_{15}} \leq 20$	2.2	17

3.2.4 Vérification des critères de Lafleur

Les filtres choisis sont donc, selon Terzaghi, compatibles avec les différents mélanges que nous allons étudier.

Le choix des d_l , le calcul des rapports R_R nous donne les résultats suivants.

Tableau 3.6 Critères de filtres selon Lafleur

	Moraine naturelle	Moraine 0% de fines	Moraine 6% de fines	Moraine 12% de fines
Cu	17.4	5.8	6	8.4
d_l (mm)	$d_{50} = 0.25$	$d_{50} = 7$	$d_{50} = 0.4$	$d_{50} = 0.38$
$O_F = d_{15}/9$	F1	$d_{15} = 0.2$	$O_F = 0.02$	
	F3	$d_{15} = 1.6$	$O_F = 0.18$	
R_R avec F1	0.08 (Bl)	0.003 (Bl)	0.05 (Bl)	0.05 (Bl)
R_R avec F3	0.72 (Br)	0.03 (Bl)	0.45 (Bl)	0.47 (Bl)

On s'aperçoit qu'en cas de suffosion on devrait retrouver un phénomène de colmatage externe. Seul le filtre grossier avec une base de moraine naturelle créeraient un pontage.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

4.1 Modélisation du problème :

Des pressions interstitielles plus élevées que la distribution théorique ont été constatées dans la partie aval du noyau de différents ouvrages de la Baie James. Le schéma ci-dessous présente la modélisation du problème. On admet que cette anomalie est recréée lorsque la perte de charge dans la cellule est concentrée dans la partie aval de la base, immédiatement au-dessus du filtre. Une analyse granulométrique comparative précise si la migration de particules est à l'origine de l'anomalie.

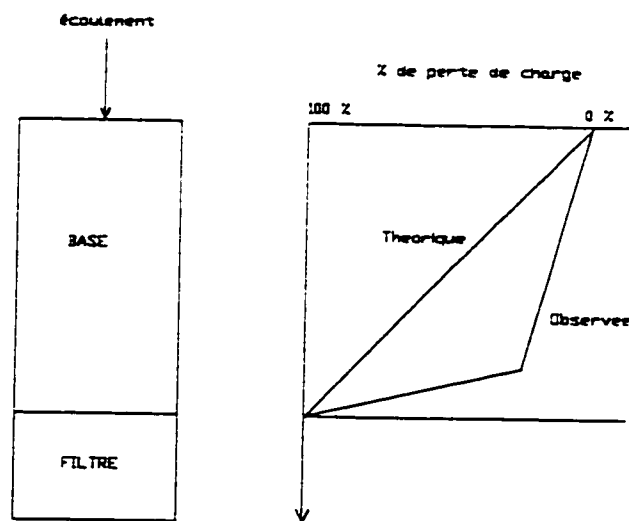


Figure 4.1 Modélisation du problème

4.2 Description du montage

La figure 4.2 présente le montage du perméamètre à paroi rigide relié à deux burettes d'entrée et de sortie soumises respectivement à des pressions d'air constantes de 637 et 600 kPa. Compte tenu des perméabilités des bases et du volume des burettes, l'écoulement doit être interrompu périodiquement pour les permuter. Les pierres poreuses aux extrémités ont une ouverture de pores estimée à 11 μm . Des capteurs de pression sont répartis sur un même axe vertical le long de la cellule. Deux capteurs lisent les pressions d'eau d'entrée et de sortie de la cellule.

Le temps, le volume d'eau dans les burettes et les pressions sont enregistrés à l'aide d'un système d'acquisition de données.

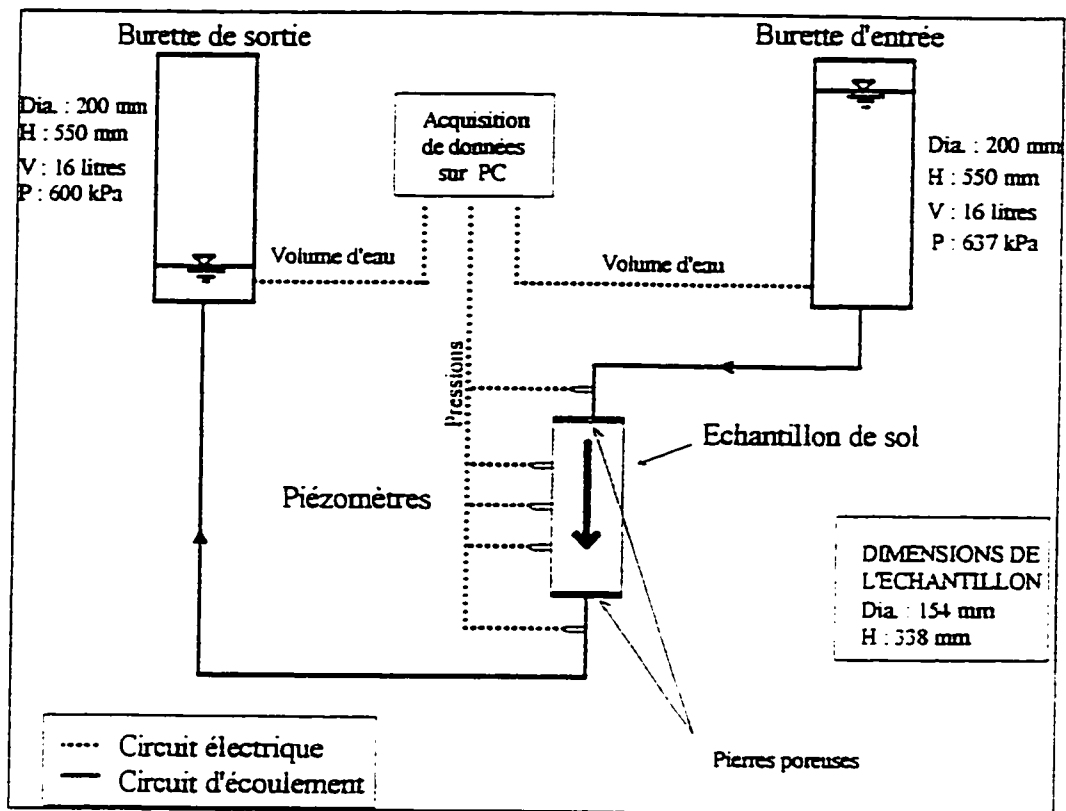


Figure 4.2 Montage d'essai de filtration

4.3 Les cellules

Deux cellules ont été utilisées, l'une avec piston, l'autre sans. Sur chacune des cellules un capteur de pression a été rajouté pour lire la pression d'eau dans le filtre granulaire. Les pertes de charge dans les conduits et les pierres poreuses ont été étalonnées et prises en compte dans les calculs.

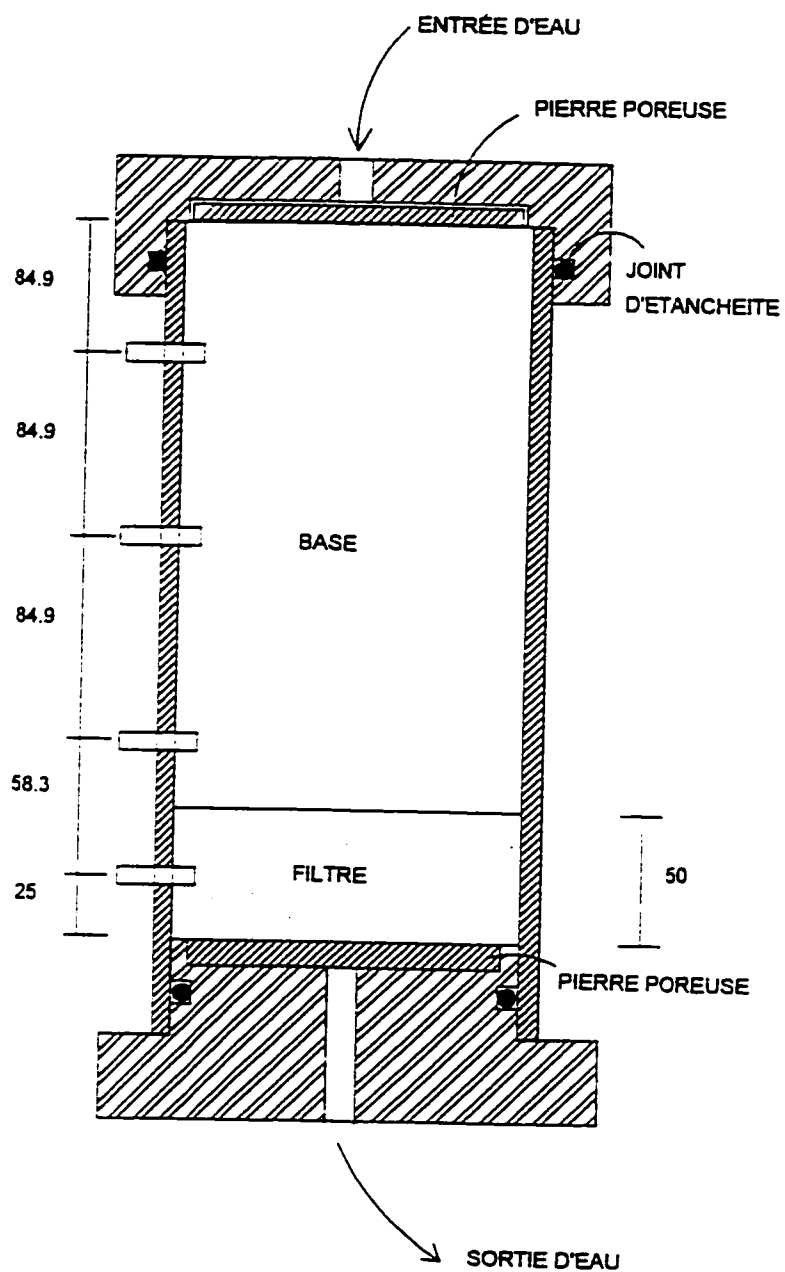


Figure 4.3 Cellule sans piston (section verticale)

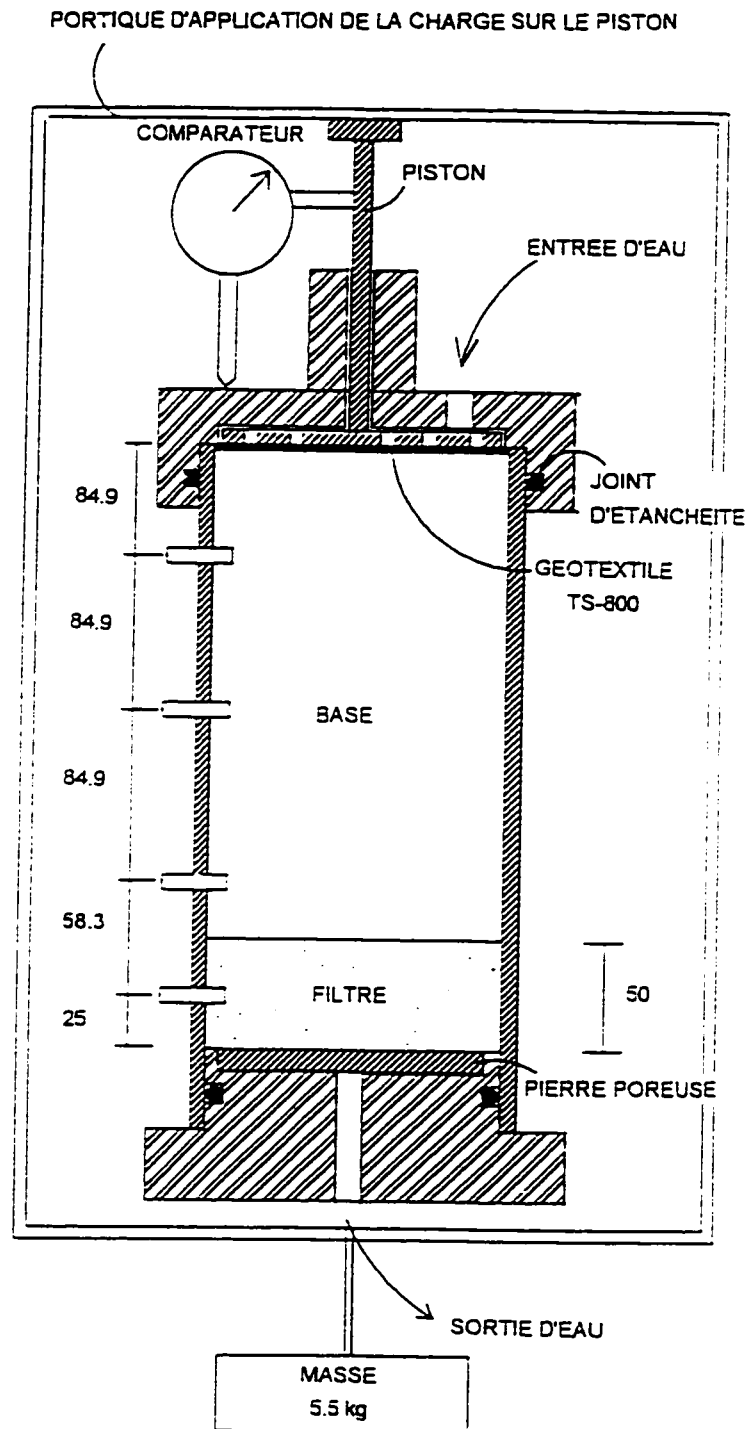
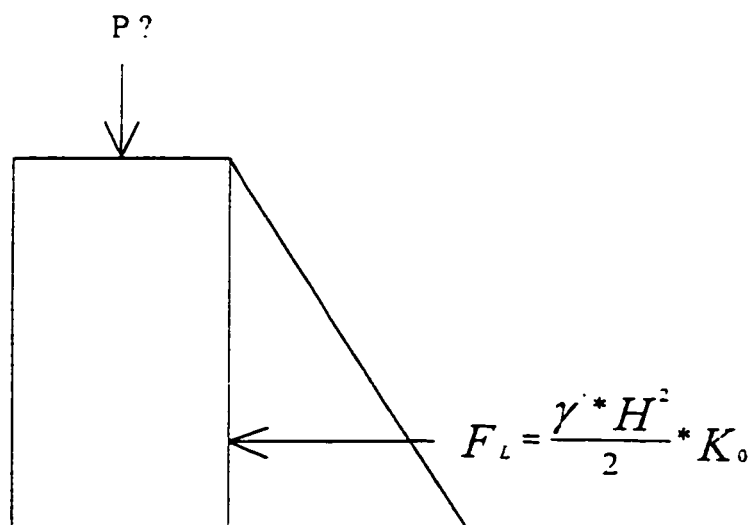


Figure 4.4 Cellule avec piston (section verticale)

4.4 Le piston

Comme il a été recommandé, un piston a été installé sur une des deux cellules. Suivant la norme ASTM D 2434-68, il est recommandé d'appliquer une force de 22 à 45 N. Le rôle du piston est de maintenir la base et le filtre en contact en tout temps, et non pas de créer une surcharge dont l'effet sur l'échantillon n'est pas l'objet de cette recherche. Le piston doit contrer le frottement entre le sol et la paroi de la cellule.

Calcul du frottement mobilisable



La moraine étant compactée, on a choisi K_0 égal à 1. (Holtz et Kovacks 1991)

$$F_L = \frac{10 \cdot 0.3^2}{2} = 0.45 \text{ kN}$$

Angle de frottement sol/acier ; $\delta = 14^\circ$, d'après USS Steel Piling Design Manual .

$$F_L = 0.45 \cdot \tan 14^\circ \cdot \pi \cdot 0.15 = 0.053 \text{ kN}$$

Pour annuler le frottement il faut appliquer une charge de 53 N , on a appliqué une masse de 5.5 kg (54 N).

4.5 Calibration du montage

Des pertes de charges sont envisageables dans le montage. Elles peuvent être localisées :

- en amont de l'échantillon: . dans la pierre poreuse supérieure
 - . les canalisations
- en aval de l'échantillon : . dans le filtre granulaire
 - . dans la pierre poreuse inférieure
 - . les canalisations.

4.5.1 Pertes de charges dans les pierres poreuses

La cellule d'essai sans piston a été remplie d'eau désaérée. On essaye plusieurs débits. Ces débits sont contrôlés par le gradient. Des mesures de pression sont prises en aval et en amont de chaque pierre poreuse. On a pu établir une relation linéaire entre le débit et les pertes de charges pour chaque pierre poreuse. Ces résultats sont présentés sur la figure 4.5

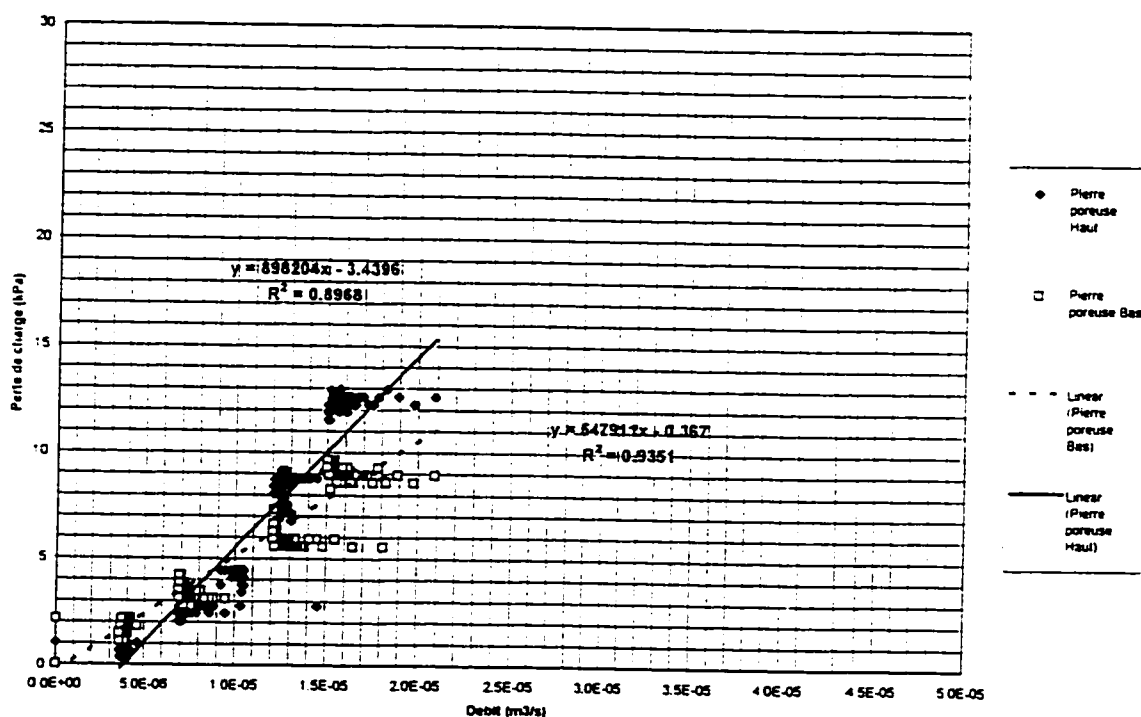


Figure 4.5 Pertes de charge dans les pierres poreuses en fonction du débit

4.5.2 Pertes de charges dans les filtres granulaires

La cellule sans piston a été remplie de filtre granulaire. Les pressions ont été mesurées à l'entrée et à la sortie de la cellule. On a pu établir la relation débit/pertes de charge pour le système pierre poreuse/filtre granulaire/pierre poreuse. L'opération a été répétée pour les deux filtres. En soustrayant les résultats obtenus à l'étape précédente à ceux obtenus ici, on a pu déterminer la perméabilité de chaque filtre. Les résultats sont présentés au chapitre précédent.

4.6 Mode opératoire

- le sol est compacté dans la cellule à l'aide d'un marteau Proctor standard à 95% de la référence. L'espace du filtre est occupé par une cale cylindrique ;
- la cellule est retournée, la cale enlevée et le filtre est légèrement compacté ;
- le sol est saturé par un écoulement ascendant gravitaire. Une burette pleine d'eau désaérée est branchée à la sortie d'eau de la cellule, juste au-dessus de la cellule. On crée une charge maximum de 0.5 kPa. On s'assure de l'avancement du front de saturation et de ne pas emprisonner de l'air en ouvrant les sorties des capteurs. L'échantillon est considéré pratiquement saturé lorsque l'eau sort par l'entrée d'eau (figure 2.3) ;
- la saturation est complétée par l'application d'une contre-pression de 600 kPa ;
- les capteurs et les burettes sont branchés sur la cellule ;

- un gradient de 10 est créé par le différentiel de pression entre la burette d'entrée et la burette de sortie ;
- les données de pressions, de volume d'eau dans les burettes en fonction du temps sont collectées sur un système d'acquisition ;
- lorsque toute l'eau contenue dans la burette d'entrée a percolé au travers de la cellule d'essai et a rempli la burette de sortie, les burettes sont permutées manuellement.
- pour un cycle de percolation les intervalles de lecture sont :
 - 10 secondes pendant 10 minutes
 - 30 secondes pendant 10 minutes,
 - 1 minute pendant 1 heures
 - 5 minutes pour le reste du temps

L'essai AS6-F3 avec un écoulement ascendant a été mis en place de la même façon. La cellule a été retournée pendant l'essai. Pour l'essai APS12-F3, on a mis en place le filtre au-dessus de la base au début de l'essai.

4.7 Procédures d'arrêt et de démontage d'un essai

L'essai est arrêté lorsque le débit et les pressions lues dans la cellule sont stables dans le temps. Le sol est découpé en quatre tranches et le filtre en deux. L'ensemble des tranches est tamisé. La figure 4.6 montre la localisation des tranches. Les essais ont duré entre 15 et 90 heures.

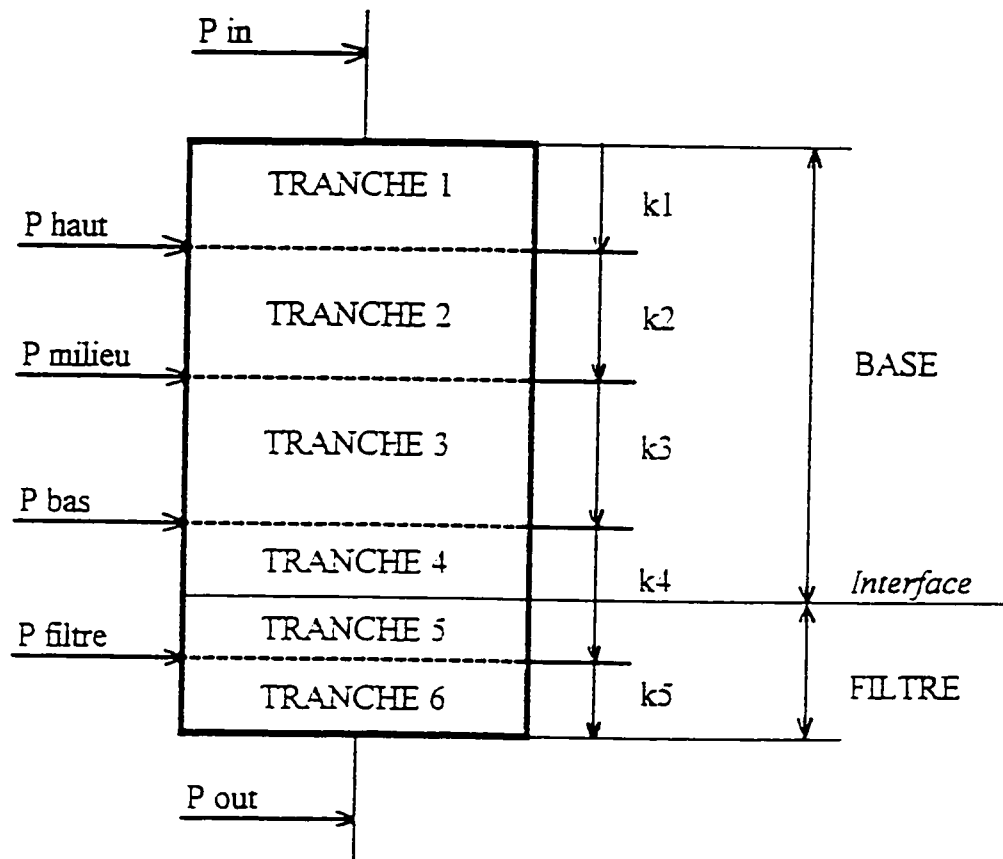


Figure 4.6 Localisation des tranches, des pressions mesurées et des perméabilités locales, dans la cellule.

4.8 Désignation des essais

La première partie représente le sol étudié, le chiffre après le S indiquant le pourcentage de fines contenu dans le sol. La deuxième partie indique le filtre utilisé. Le nombre après le F indique la granulométrie du filtre : 1-fin; 3-grossier. Deux préfixes peuvent être utilisés en supplément: A-indique que l'écoulement est ascendant; P- indique que l'essai a été réalisé sur la cellule avec piston.

Tableau 4.1 Exemples de désignations d'essais:

S0-F1	<ul style="list-style-type: none"> - Sol à 0% de fine - Filtre fin - Cellule sans piston
PS6-F3	<ul style="list-style-type: none"> - Cellule avec piston - Sol à 6% de fines - Filtre grossier
APS12-F3	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoulement ascendant - Cellule avec piston - Sol à 12% de fines - Filtre grossier

4.9 Traitement des données

4.9.1 Les données

Les données récoltées pour chaque essais sont :

- le temps (min)
- le volume des burettes (litres)
- les pressions d'eau (kPa)

4.9.2 Etapes de calculs

Le tableau 4.2 présente les étapes du traitement des données, les opérations réalisées et les graphiques qui en découlent.

Tableau 4.2 Étapes et opérations du traitement de données

Étapes	Operations	Variables	Graphiques
1-Calcul du gradient	$i = \frac{P_{sortie} - P_{entree}}{L * g}$	P = charge en kPa L = longueur de la cellule = 0.338 m g = accélération gravitationnelle = 9.81 m/s ²	
2-Calcul du débit	$Q = \frac{V}{T * 60}$	Q en m ³ /s V = volume d'eau cumulé, en litres T = temps cumulé en minutes	Débit en fonction du temps
3-Calcul de la perméabilité	$k = \frac{Q}{i * A}$	A = aire de la cellule = 0.0187 m ²	Perméabilité en fonction du temps
4-Normalisation des charges pour i = 10	$P_{i,0} = \frac{P_{mesuree}}{i} * 10$		
5-Calcul des charges relatives	$P_n = P_i - P_{sortie}$	P _i et P _{sortie} obtenues à l'étape 4	Charges relatives en fonction du temps
6-Calcul des perméabilités locales	$k_i = \frac{d * Q * g}{A * (P_i - P_{i-1})}$	P _i et P _{i-1} obtenues à l'étape 4 d = distance entre deux capteurs successifs	Perméabilités locales en fonction du temps
7-Calcul du pourcentage de perte de charge	$\Delta\% P = \frac{(33.7 - P_i) * 100}{33.7}$	P _i obtenue à l'étape 5	Pertes de charge le long de la cellule en fonction du temps

CHAPITRE 5

RESULTATS DES ESSAIS

5.1 Production de fines au compactage

L'un des objectifs de cette recherche est de déterminer le pourcentage de fines à partir duquel la moraine LG4 devient suffosive.

En se basant sur les résultats de l'étude précédente, on a restreint notre champ d'investigation à des sols dont le pourcentage nominal de fines est compris entre 0 et 12%. Ce qui devait borner notre étude à des sols dont la teneur réelle en fines est comprise entre 9.9 et 19%. On a décidé de procéder de façon dichotomique, en commençant par la borne inférieure.

Notre recherche a commencé par les essais S0-F1 et S0-F3. Les échantillons de sol ne contenaient quasiment pas de fines (1 à 2%). Ceci a remis en cause la production de fines lors du compactage. On a donc repris l'étude sur la production de fines et entrepris une étude complémentaire sur le lavage de la moraine naturelle. Les résultats sont présentés dans l'annexe D.

Les étapes suivantes ont été :

- la série d'essais sur les sols à 12 % de fines
- la série d'essais sur les sols à 6 % de fines.

Pour chaque étape , on donne :

- les résultats des perméabilités, des pertes de charges et des perméabilités locales sont synthétisés dans l'analyse de la percolation

les résultats des analyses granulométriques des bases et filtres sont synthétisés dans l'analyse granulométrique

5.2 Essais à 0 % de fines

Le tableau ci-dessous présente les essais réalisés, la densité sèche, la teneur en eau et la compacité relative atteinte lors de la mise en place.

Tableau 5.1 Caractéristiques des sols mis en place

Essais réalisés	Densité sèche ρ_d (kg/m ³)	Teneur en eau w (%)	Compacité Relative (%)
S0-F1	1921	5.9	98
S0-F3	1901	6.1	97

5.2.1 Analyse de la percolation

La stabilité du débit a été atteinte au bout d'une heure. Les perméabilités globales du sont du même ordre de grandeur. On obtient $k_{S0-F1} = 5 * 10^{-5}$ m/s, et $k_{S0-F3} = 2 * 10^{-5}$ m/s.

On constate que la perte de charge est linéaire entre le haut de l'échantillon et le haut de la tranche 4 (figs 5.1, 5.2). Il n'y a pas de perte de charge dans la tranche 4. La perméabilité des filtres est beaucoup plus élevée que celle mesurée lors des essais. La perméabilité des filtres influe sur la perméabilité locale k_i .

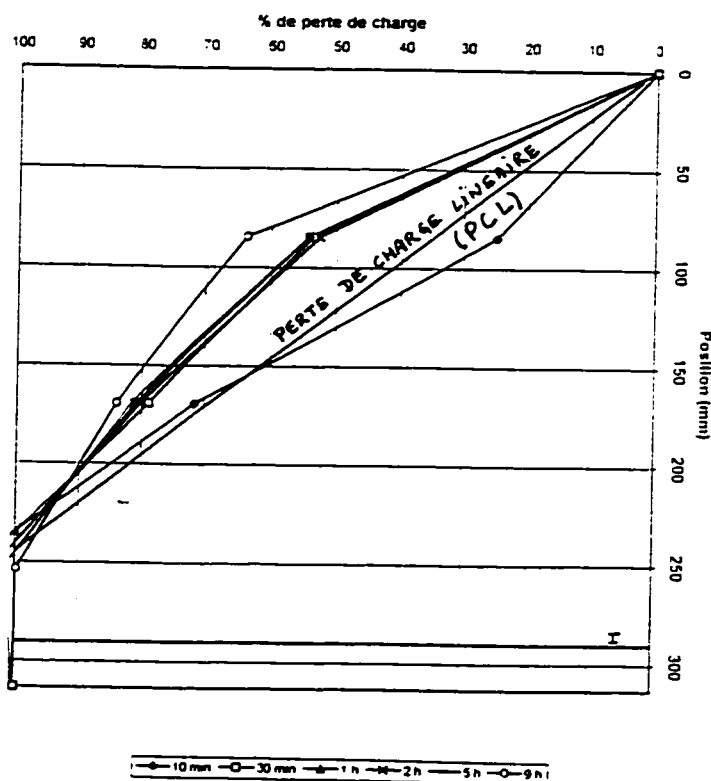


Figure 5.1 Pertes de charge de l'essai S0-F1

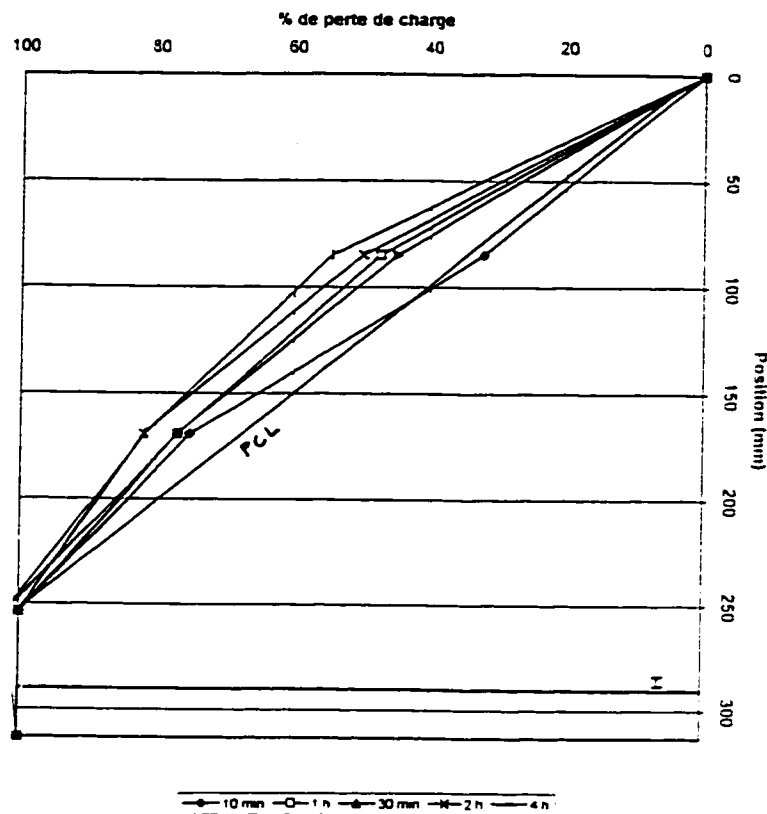


Figure 5.2 Pertes de charge de l'essai S0-F3

5.2.2 Analyses granulométriques

Les courbes des tranches et celles des mélanges visés se superposent, aussi bien pour les filtres que pour les sols (fig 5.3). Les seuls écarts que l'on peut constater se situent dans la partie grossière. Cela s'explique par le manque ou la présence d'un caillou qui influence de façon significative l'allure de la courbe. On note la présence de fines en très faible quantité (entre 0.6 et 2.5 %). Le lavage et le tamisage ne sont pas efficace à 100 %. Il y a des fines résiduelles. Dans la partie fine, on ne note aucune variation entre les tranches.

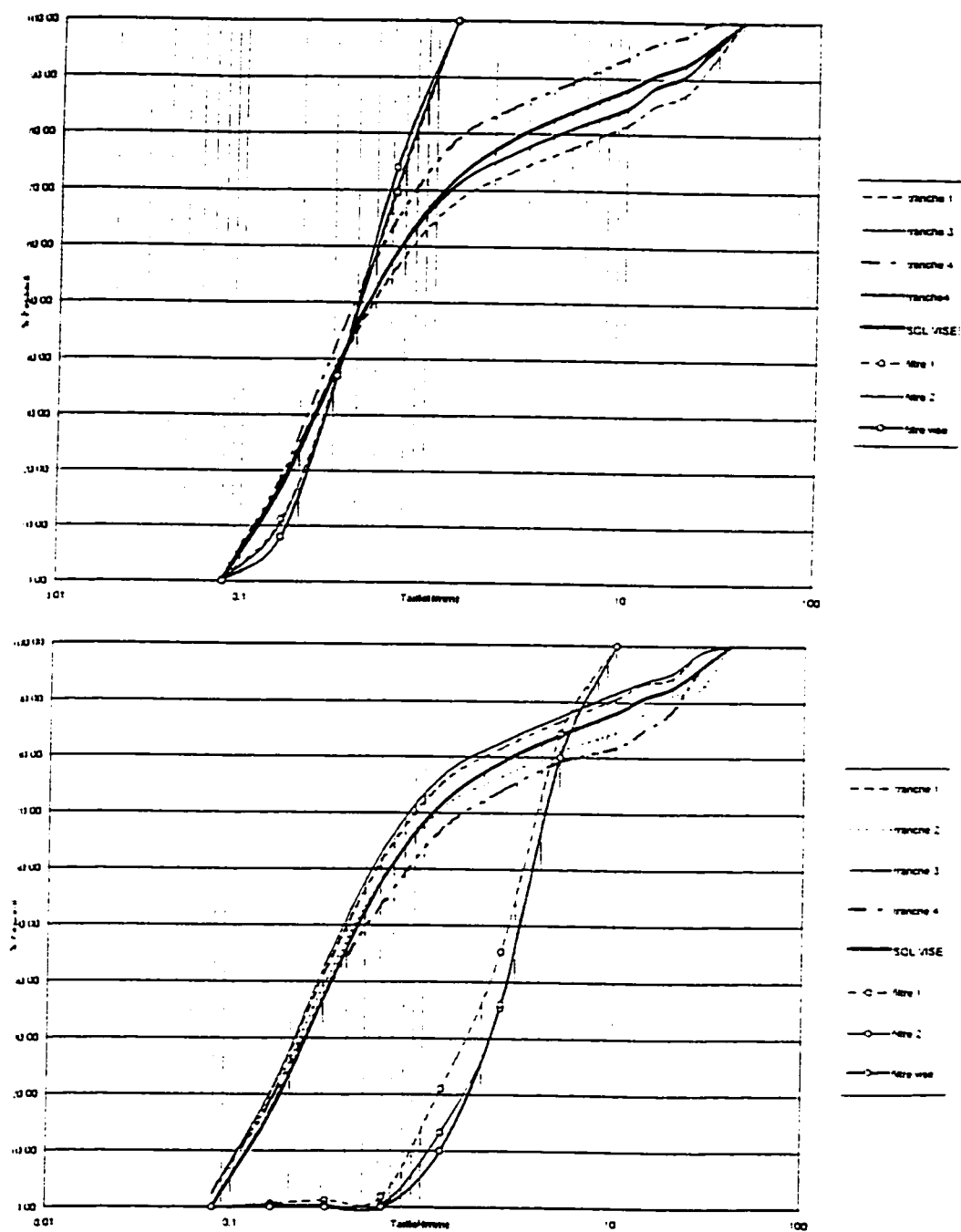


Figure 5.3 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre)

des essais S0-F1 (en haut) et S0-F3 (en bas)

5.2.3 Conclusions sur les sols à 0 % de fines

Les sols à 0% de fines sont stables. Il n'y a ni migration de particules comprises entre 80 μm et 40 mm, ni concentration des pertes de charge à l'aval de l'échantillon. La fraction fine, même en très faible quantité ne montre pas de variation. Ce dernier résultat est à relativiser. Les quantités mesurées sont inférieures à la précision du tamisage.

5.3 Essais à 12 % de fines

Le tableau ci-dessous présente les essais réalisés, la densité sèche, la teneur en eau et la compacité relative atteinte lors de la mise en place.

Tableau 5.2 Caractéristiques des sols mis en place

Essais réalisés	Densité sèche ρ_d (kg/m^3)	Teneur en eau w (%)	Compacité Relative (%)
S12-F1 (1)	1930	6.2	96
S12-F1 (2)	1950	6.3	97
S12-F3	1970	6.2	98
PS12-F3	1910	6.1	95
APS12-F3	1950	6.3	97

5.3.1 Analyse de la percolation

La stabilité du débit a été atteinte au bout de 5 heures pour les plus lents (S12-F1 et PS12-F3), et au bout de 2 heures pour le plus rapide (S12-F3).

Les perméabilités globales sont du même ordre de grandeur. Elles sont comprises entre $2 \cdot 10^{-6}$ m/s et $3.2 \cdot 10^{-6}$ m/s.

On peut séparer ces essais en deux familles :

1-Essais réalisés avec le filtre grossier

- pour les essais S12-F3 et PS12-F3, la pente de la perte de charge croît d'amont en aval. La courbe se situe au-dessus de la perte de charge linéaire (figs 5.4 et 5.5). Le tableau 5.3 montre que cela s'accompagne d'une croissance des perméabilités locales entre les tranches 1 et 3. Il n'y a pratiquement pas de pertes de charge dans la tranche 4. S12-F3 montre une pente inversée dans les tranches 4 et 5 (voir discussion section 5.5.1).
- les pertes de charge de l'essai APS12-F3 sont quasiment linéaires (fig 5.6). Toutefois, on note que les perméabilités locales décroissent de la tranche 1 à la tranche 3.

2-Essais réalisés avec le filtre fin

- pour les essais S12-F1 (1 et 2), la pente de la perte de charge décroît de l'amont vers l'aval (fig 5.7). La courbe de perte de charge se situe sous la perte de charge linéaire

dans le haut de l'échantillon et sur la perte de charge linéaire dans le bas de l'échantillon. Le comportement varie avec le temps : S12-F1 (1) s'écarte de la perte de charge linéaire alors que S12-F1 (2) s'en rapproche et devient quasiment linéaire. L'essai S12-F1 (1) ne présente pas de pertes de charge dans la tranche 4 contrairement à S12-F1 (2).

- Les perméabilités locales décroissent d'amont en aval (tableau 5.3)

On constate sur l'ensemble des essais qu'il n'y a pas ou très peu de pertes de charges entre le haut de la tranche 4 et le bas de la tranche 5. Cette perte de charge est visible sur les essais APS12-F3 et S12-F1 (2) où la perte de charge est presque linéaire. La perte de charge enregistrée dans la tranche 6 est comprise entre 0 et 10 %.

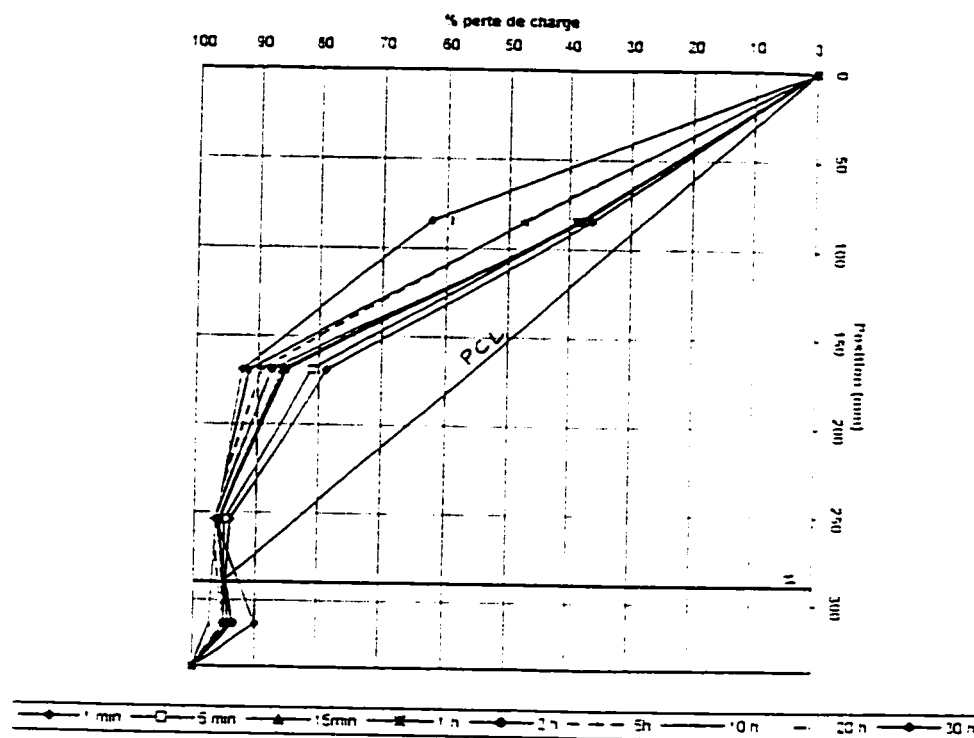


Figure 5.4 Pertes de charge de l'essai S12-F3

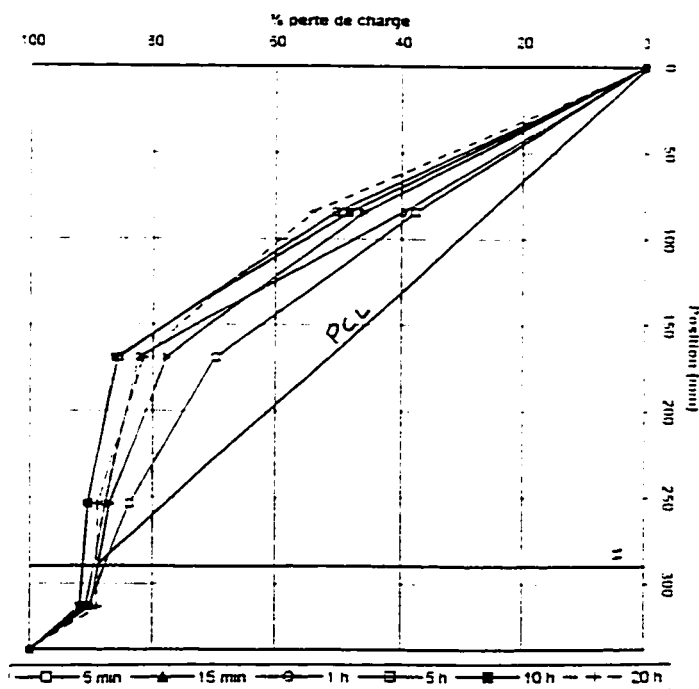


Figure 5.5 Pertes de charge de l'essai PS12-F3

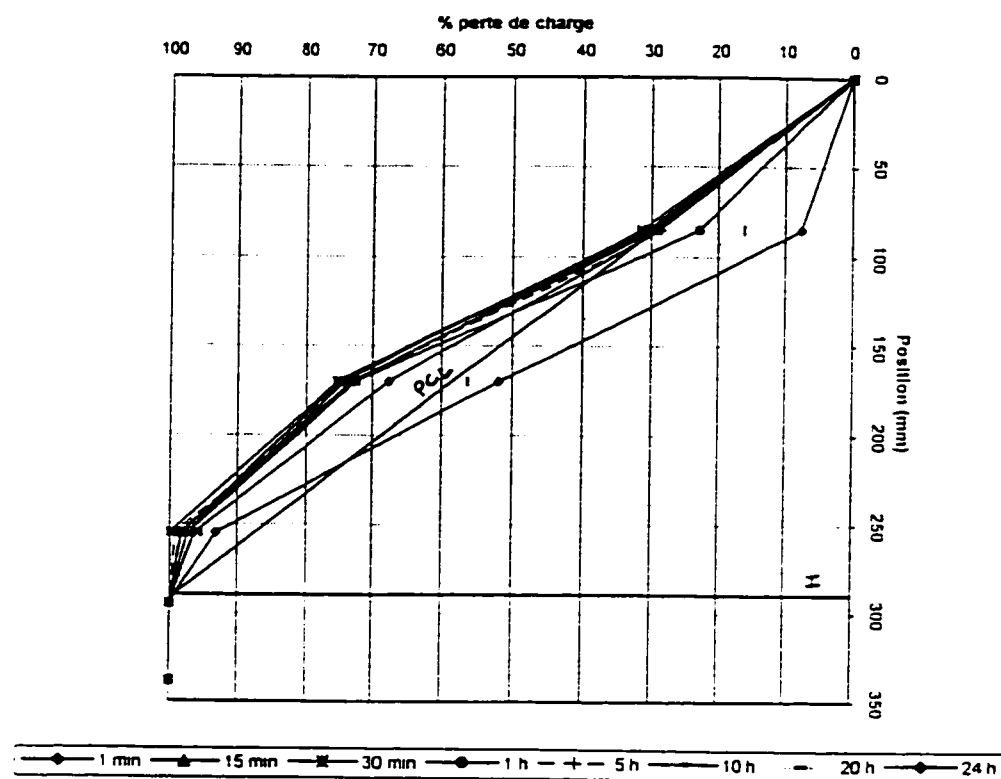


Figure 5.6 Pertes de charge de l'essai APS12-F3

Tableau 5.3 Perméabilités locales finales enregistrées dans les tranches (en m/s)

	S12-F3	PS12-F3	APS12-F3	S12-F1 (1)	S12-F1 (2)
K1	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$6.98 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$4.2 \cdot 10^{-6}$
K2	$2.4 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$1.17 \cdot 10^{-6}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
K3	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
K4		$1.2 \cdot 10^{-3}$	$5.84 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$
K5	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$			$1.6 \cdot 10^{-6}$

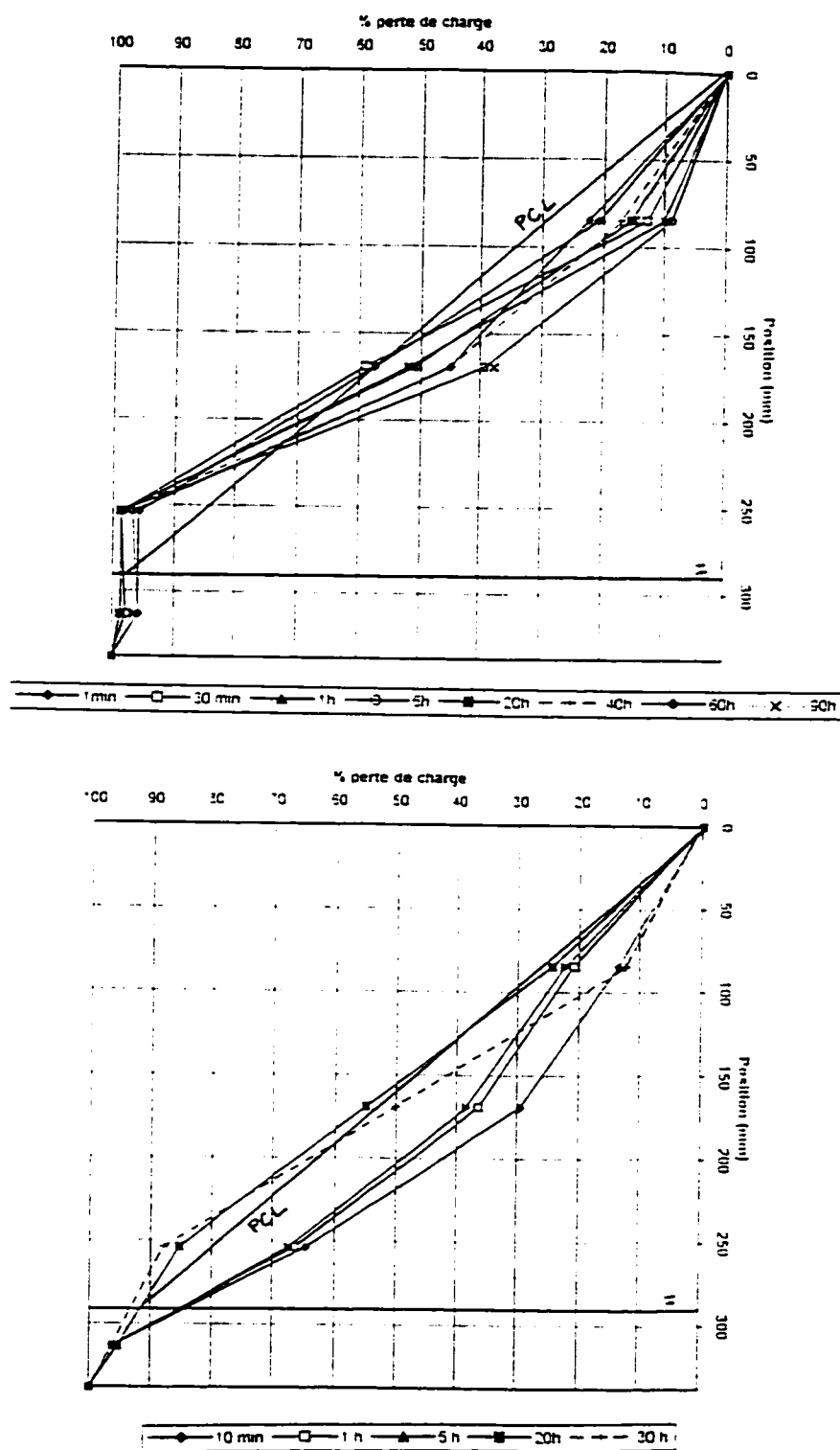


Figure 5.7 Pertes de charge des essais S12-F1 (1 en haut ; 2 en bas)

5.3.2 Analyses granulométriques

5.3.2.1 Les bases

Les analyses granulométriques des bases des essais APS12-F3 et S12-F1 (1 et 2) ne montrent pas de variations significatives entre les tranches. (figures 5.8 et 5.9)

La tranche 4 de l'essai S12-F3 montre un déficit de particules comprises entre 0.1 et 20 mm. Le pourcentage de fines ne varie pas entre les tranches (figure 5.10).

La tranche 4 de l'essai PS12-F3 montre un déficit de particules comprises entre 80 μm et 4 mm. Ce déficit est dû en partie à l'excès de particules grossières, qui influence l'allure de la courbe. On note que le pourcentage de fines de la tranche 4 est inférieur à celui des trois autres tranches (figure 5.11).

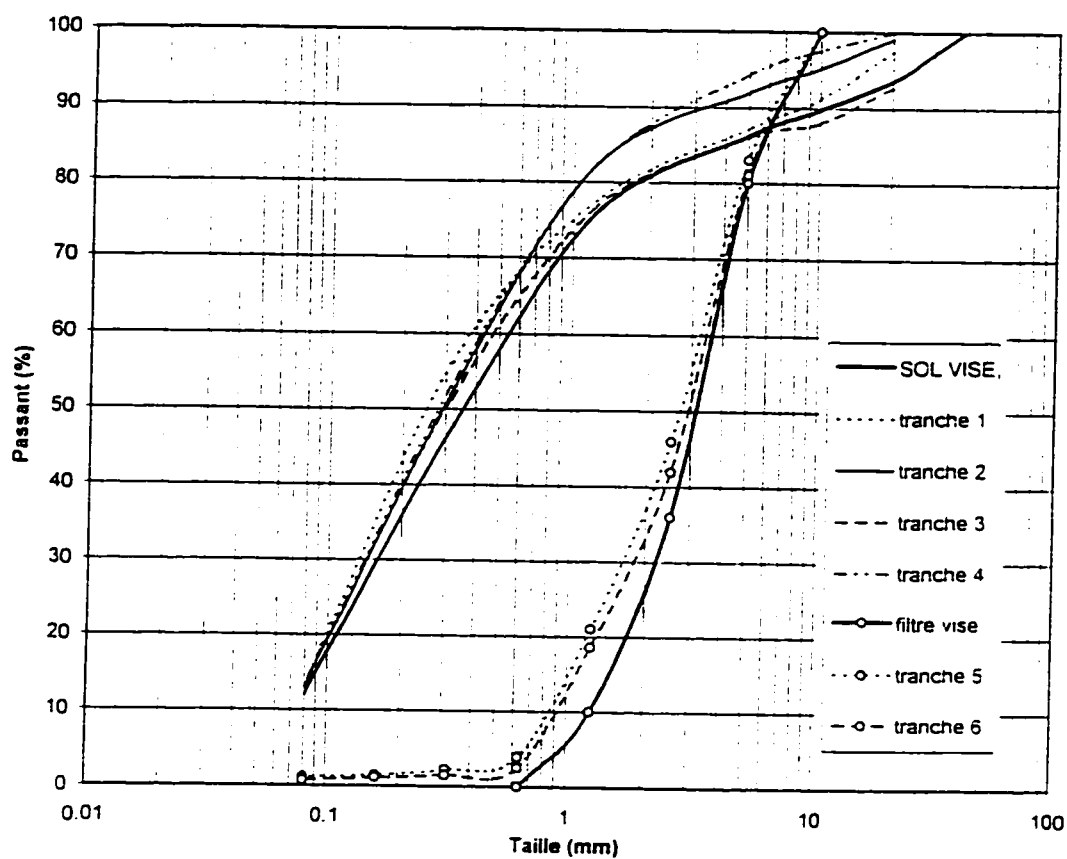


Figure 5.8 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai

APS12-F3

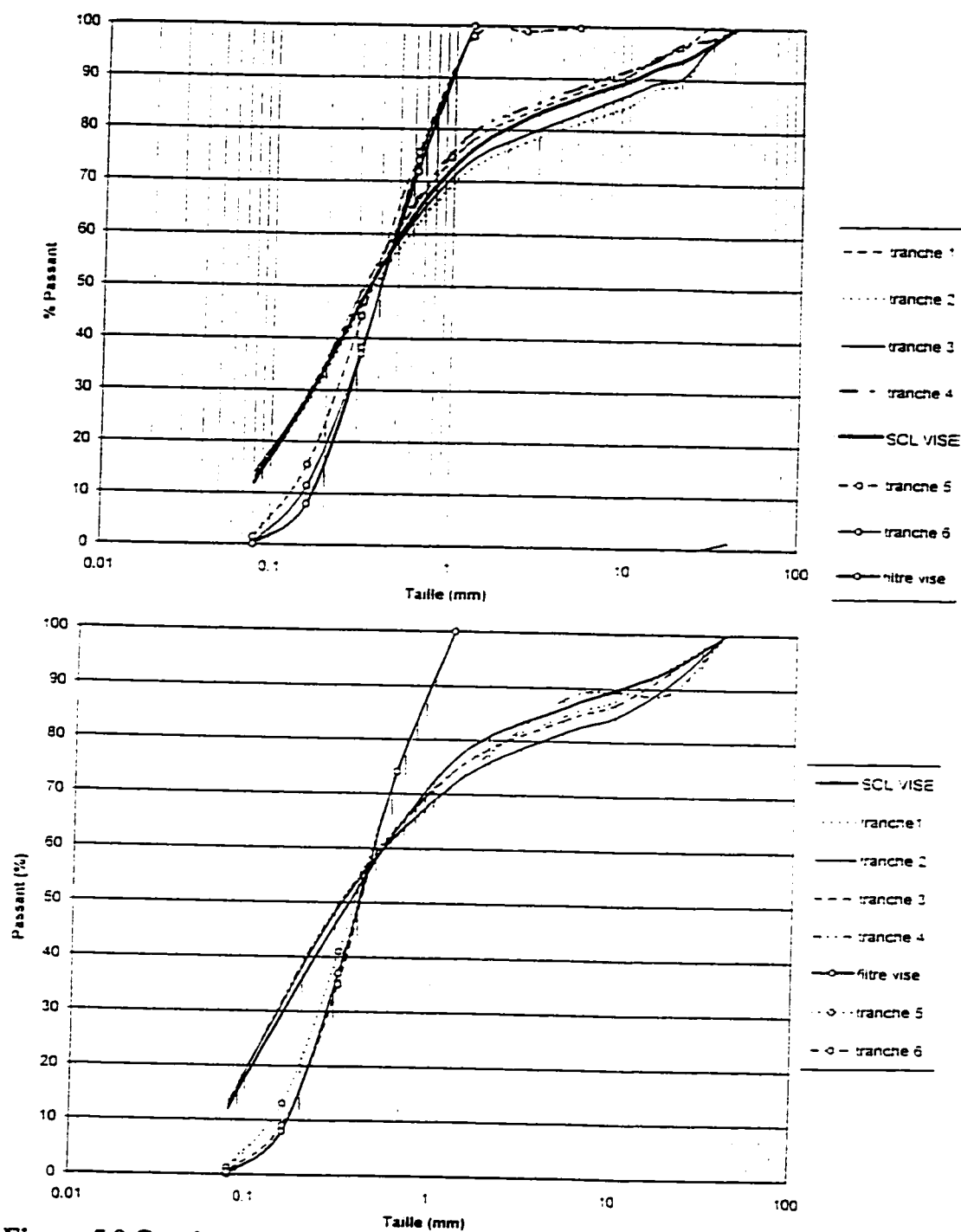


Figure 5.9 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) des essais S12-F1

(1-en haut ; 2-en bas)

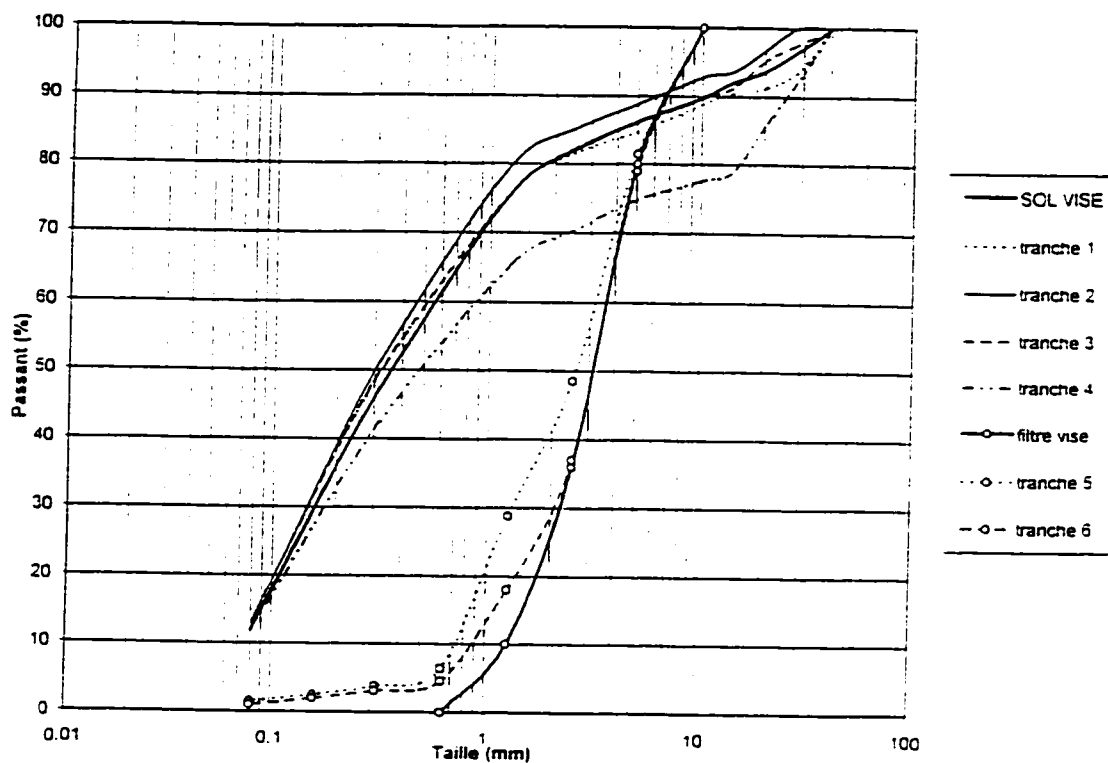


Figure 5.10 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai S12-F3

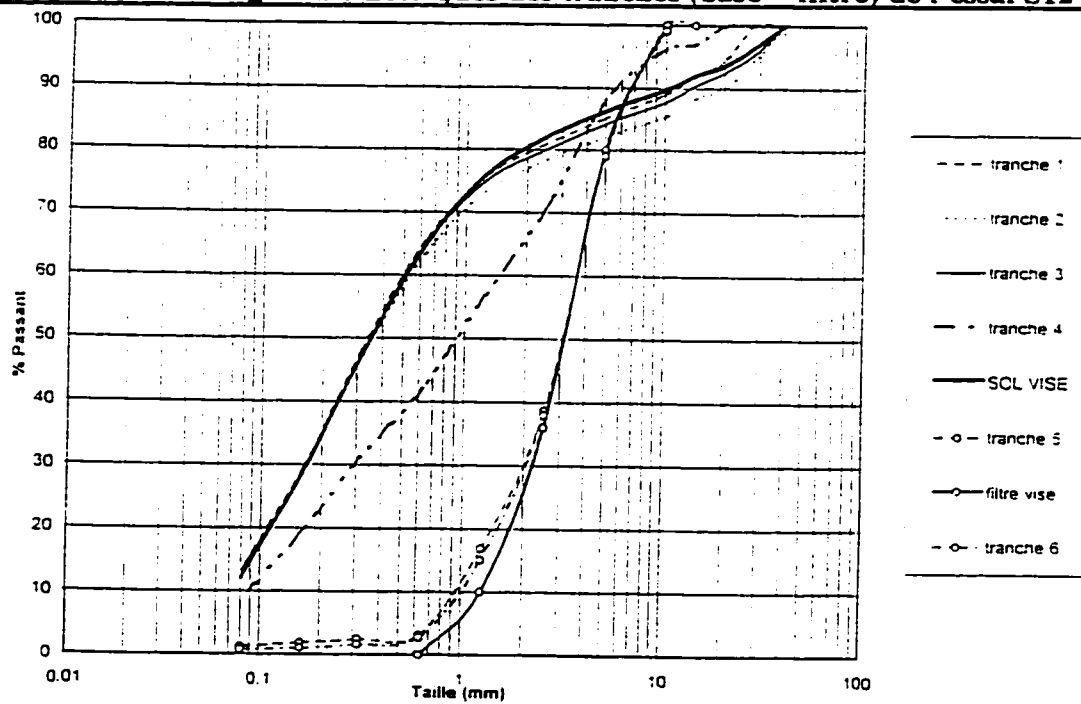


Figure 5.11 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai

PS12-F3

5.3.2.2 Les filtres

On note sur les figures 5.8 à 5.11 les augmentations de particules fines dans les tranches 5 et 6.

Les figures 5.12 et 5.13 donnent les écarts entre la granulométrie visée pour un filtre et celle mesurée sur les filtres après l'essai.

Pour les essais S12-F3, PS12-F3 et APS12-F3, on note la présence de particules comprises entre 0 et 630 μm . Cette fraction n'est pas initialement contenue dans F3 (figure 3.7). Il y a donc pénétration de particules dans le filtre. Dans ces trois cas, le pourcentage de particules qui pénètrent décroît entre la tranche 5 et la tranche 6.

On note aussi la présence en excès de particules comprises entre 0.630 et 2.5 mm. Dans l'essai PS12-F3, la fraction en excès correspond à la fraction en déficit dans la tranche 4.

Pour l'essai S12-F3, cette relation est moins marquée.

Dans le cas des essais réalisés avec F1, on note aussi un excès de particules comprises entre 0 et 315 μm .

5.3.3 Conclusions sur les essais à 12 % de fines

Les pertes de charge sont au-dessus de la distribution linéaire avec le filtre grossier et au-dessous avec le filtre fin. L'essai avec écoulement ascendant et piston indique une distribution linéaire.

Les pertes de charge dans les tranches 4 et 5 et dans la tranche 6 sont faibles elles varient entre 0 et 10 %. On a une perte de charge maximale de 12 % entre le haut de la tranche 4 et le bas de la tranche 6.

Les analyses granulométriques des bases ne montrent aucune variation entre les tranches. La base est stable. A l'interface base/filtre deux phénomènes distincts sont à noter :

1-avec F3 :

la pénétration de particules comprises entre 0 et 0.630 mm et l'excès de particules comprises entre 0.630 et 2.5 mm dans le filtre, s'accompagnent d'une augmentation d'amont en aval des pentes des pertes de charge et des perméabilités locales.

2-avec F1 ;

l'excès de particules comprises entre 0 et 0.630 mm s'accompagne d'une diminution des pentes des pertes de charge. La courbe de perte de charge est située sous la perte de charge linéaire, mais dans un cas la courbe de perte de charge se rapproche de la perte de charge linéaire, dans l'autre cas elle s'en éloigne.

Soulignons que le prélèvement des tranches 4 et 5 est délicat. Il est quasiment impossible de séparer ces deux tranches selon un plan parfait. Des particules des bases se retrouvent dans le filtre, ce qui explique les excès sur les fractions communes aux filtres et aux bases.

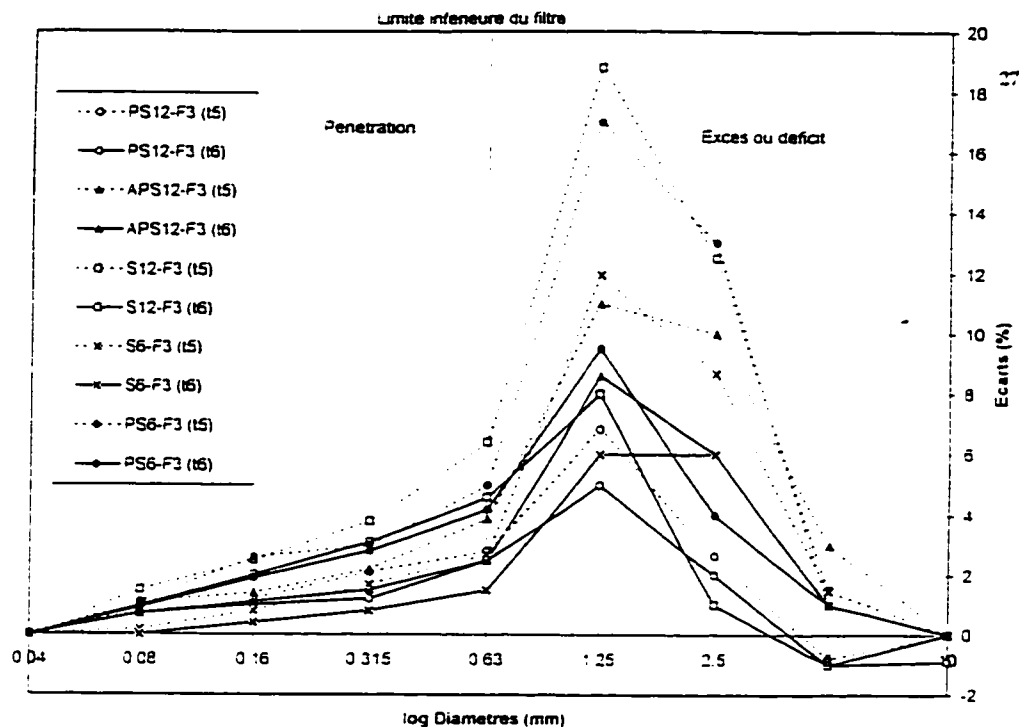


Figure 5.12 Excès ou déficit de particules dans le filtre grossier

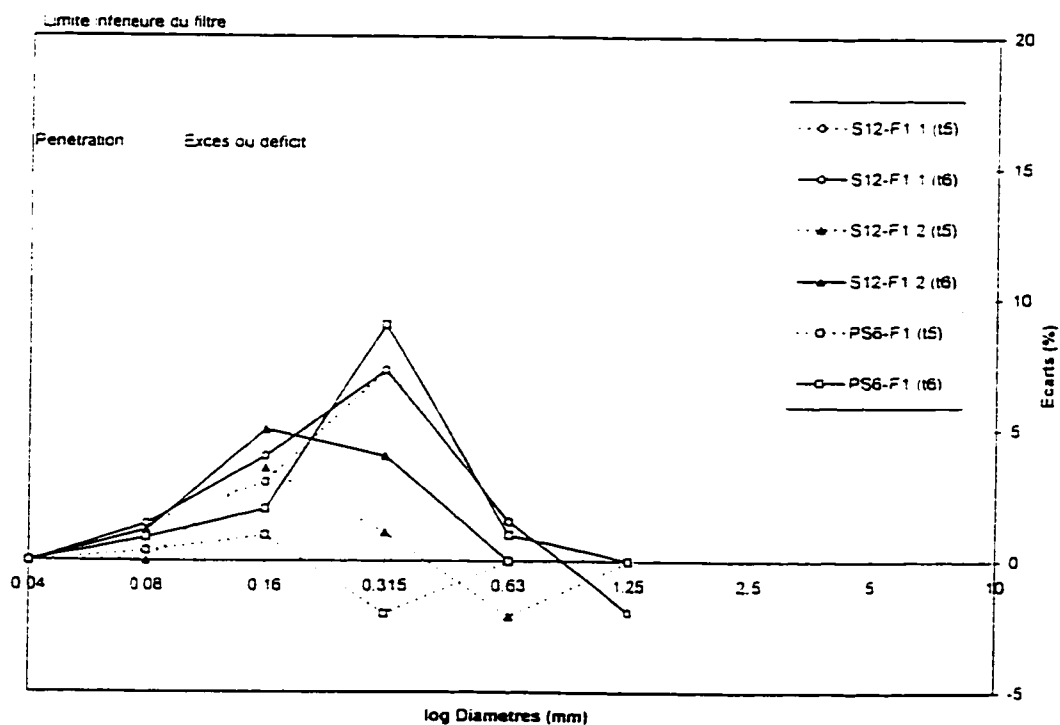


Figure 5.13 Excès ou déficit de particules dans le filtre fin

5.4 Essais à 6 % de fines

Le tableau ci-dessous présente les essais réalisés, la densité sèche, la teneur en eau et la compacité relative atteinte lors de la mise en place.

Tableau 5.4 Caractéristiques des sols mis en place

Essais réalisés	Densité sèche ρ_d (kg/m ³)	Teneur en eau w (%)	Compacité Relative (%)
S6-F3	1982	6.3	97
AS6-F3			
PS6-F3	1982	6.3	97
PS6-F1	2002	6.1	98

5.4.1 Analyse de la percolation

La stabilité du débit est quasi-immédiate : de 10 à 20 minutes. Au bout de 16 heures, S6-F3 a été retourné pour devenir AS6-F3.

Les perméabilités globales sont comprises entre $3.4 * 10^{-6}$ m/s et $1.8 * 10^{-5}$.

A l'exception de PS6-F3 (figure 5.14), tous les essais présentent une perte de charge qui se situe au-dessus de la perte de charge linéaire.

Le tableau 5.5 montre que dans tous les essais la perméabilité croît d'amont en aval, mais les perméabilités enregistrées dans l'essai PS6-F1 sont dix fois plus petites.

Pour les essais S6-F3 et AS6-F3, on remarque que la pente de la perte de charge est inversée dans les tranches 4 et 5 (figures 5.16 et 5.17).

Ce point est discuté à la section 5.5.1.

La perte de charge dans la tranche 6 varie entre 10 et 15%.

Tableau 5.5 Perméabilités locales finales enregistrées dans les tranches (en m/s)

	S6-F3	AS6-F3	PS6-F3	PS6-F1
K1	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$8.71 \cdot 10^{-6}$	$2.4 \cdot 10^{-6}$
K2	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.24 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-6}$
K3	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2.86 \cdot 10^{-5}$	$5.08 \cdot 10^{-6}$
K4		$6.5 \cdot 10^{-5}$		$5.8 \cdot 10^{-6}$
K5	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$8.08 \cdot 10^{-6}$	$1.53 \cdot 10^{-6}$

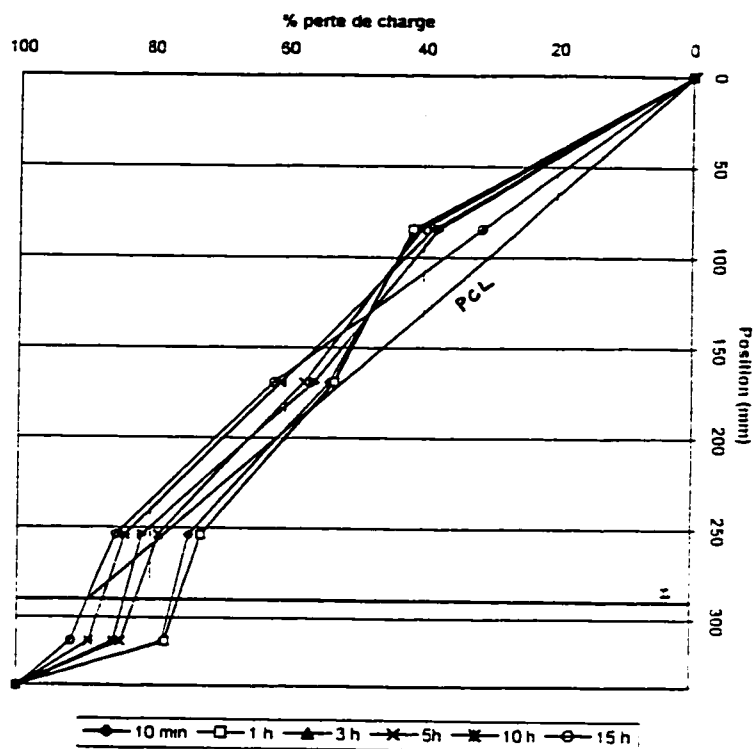


Figure 5.14 Pertes de charge de l'essai PS6-F3

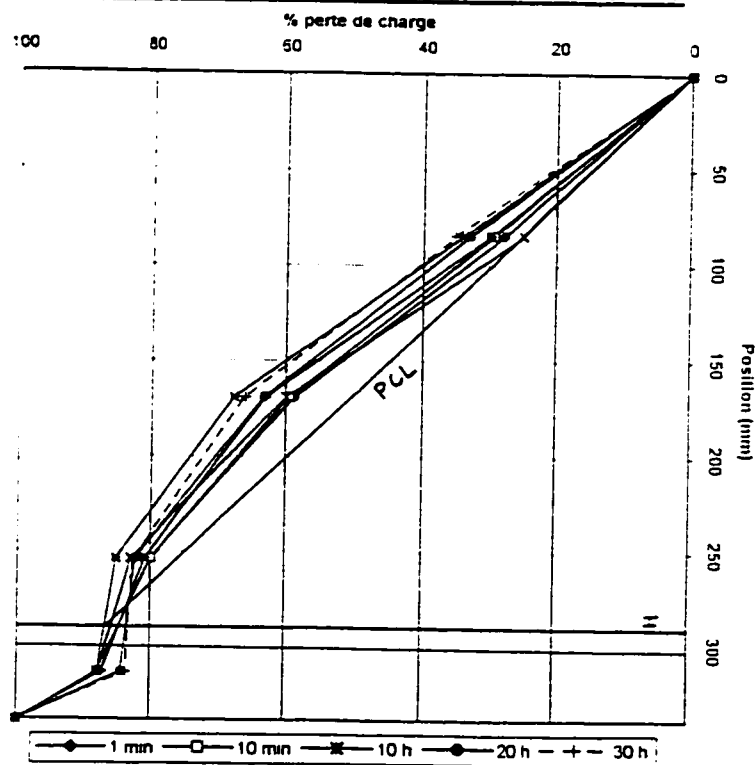


Figure 5.15 Pertes de charge de l'essai PS6-F1

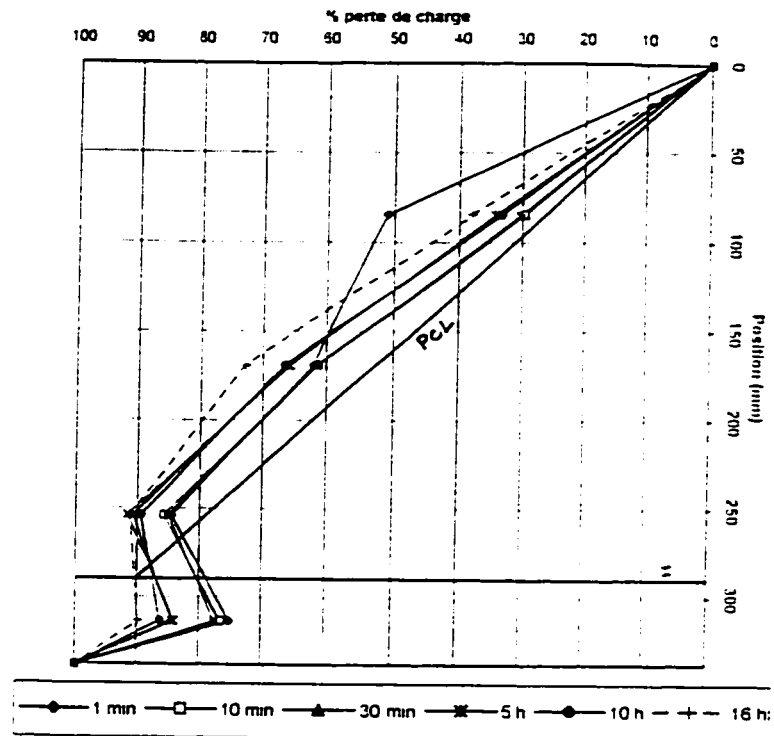


Figure 5.16 Pertes de charge de l'essai S6-F3

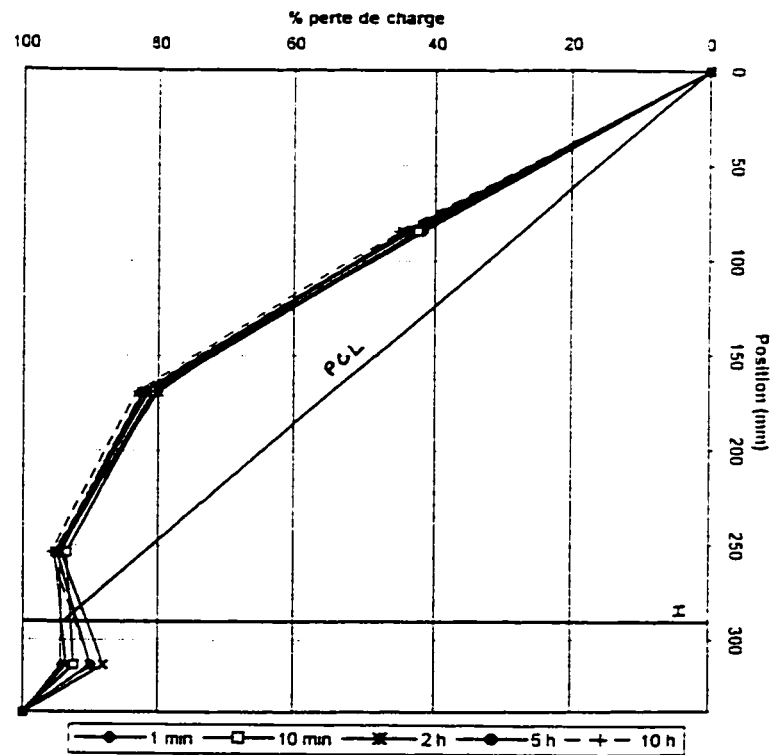


Figure 5.17 Pertes de charge de l'essai AS6-F3

5.4.2 Analyses granulométriques

5.4.2.1 Les bases

Les analyses granulométriques des bases ne montrent pas de variation entre les tranches.

5.4.2.2 Les filtres

On note sur les figures 5.18 et 5.19 une augmentation de particules fines dans les tranches 5 et 6.

La figure 5.12 montre qu'il y a eu pénétration de particules inférieures à 0.630 mm, pour tous les essais réalisés avec le filtre grossier. On note aussi un excès de particules moyennes (0.630-2.5 mm).

L'essai S6-F1 a un faible excès de particules ($< 2\%$) dans les tranches 5 et 6. La tranche 5 montre un excès important de particules de 0.315 mm. (figure 5.13)

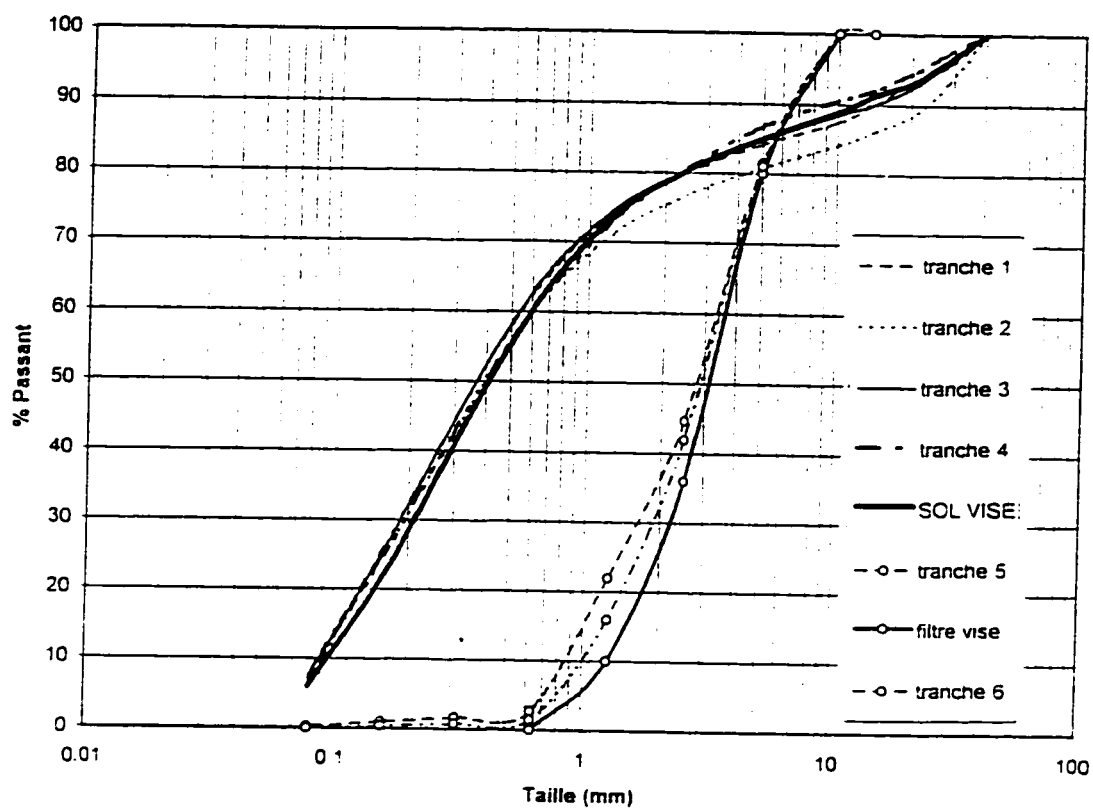


Figure 5.18 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre)
des essais S6-F3 et AS6-F3

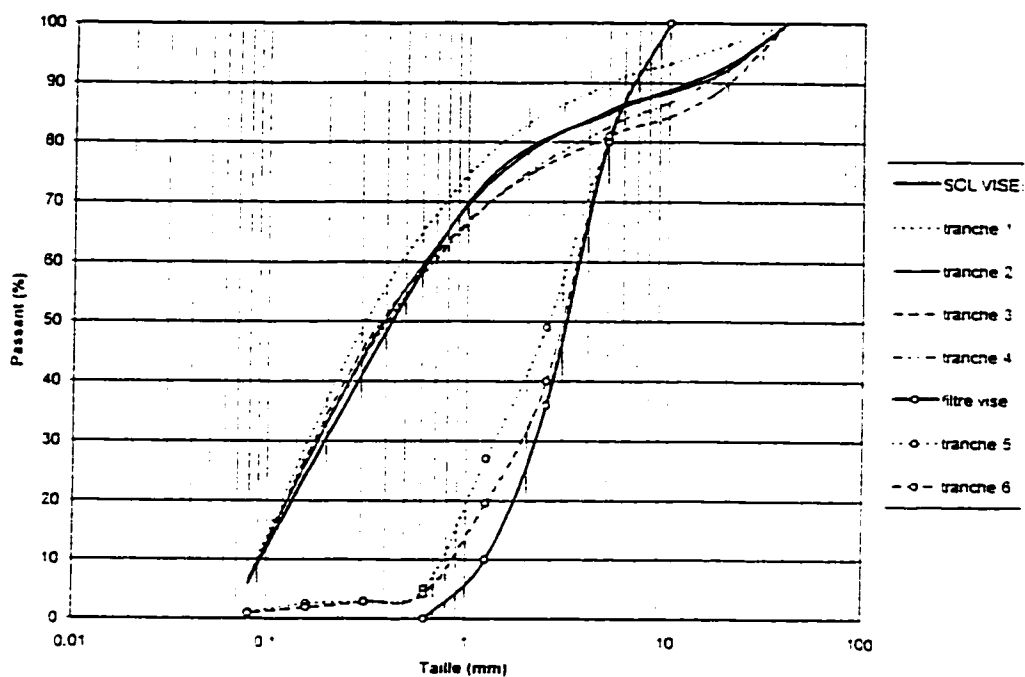


Figure 5.19 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai PS6-F3

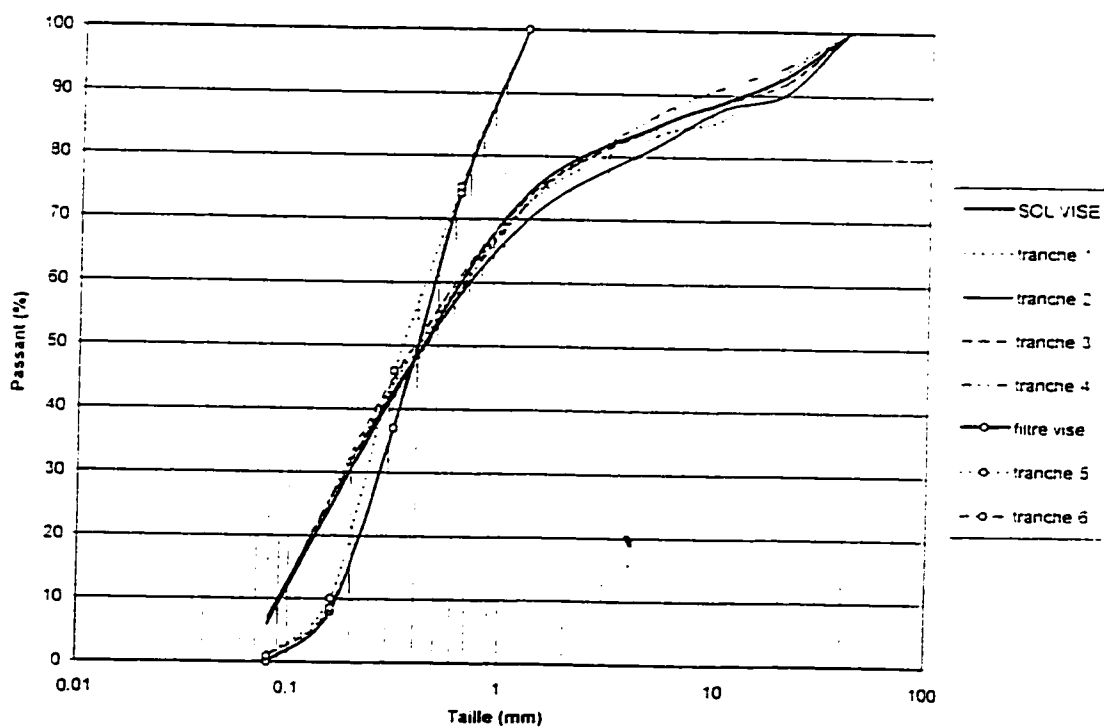


Figure 5.20 Courbes granulométriques des tranches (base + filtre) de l'essai PS6-F1

5.4.3 Conclusions sur les essais à 6 % de fines

A l'exception de l'essai PS6-F3, les pertes de charge sont situées au-dessus de la perte de charge linéaire. Dans tous les cas on note une augmentation de l'amont vers l'aval, des perméabilités locales.

Il n'y a des pertes de charge dans la tranche 4 que pour l'essai PS6-F3 . Les pertes de charges dans la tranche 6 sont un peu plus élevées. Elles peuvent atteindre 15%. La perte de charge totale entre le haut de la tranche 4 et le bas de la tranche 6 varie entre 10 et 25 %.

Les analyses granulométriques ne montrent aucune variation entre les tranches. Les essais avec le filtre grossier ont montré une pénétration de particules inférieures à 0.630 mm, et un excédent de particules moyennes (0.630-2.5 mm). Des particules comprises entre 0 et 0.630 mm sont excédentaires dans le filtre fin de l'essai PS6-F1.

5.5 Limitation des résultats

Comme on l'a vu dans les sections précédentes plusieurs facteurs semblent influencer les résultats de façon significative. On expose dans les sections qui suivent ces facteurs et on explique leur influence sur les résultats que nous avons obtenus.

5.5.1 Précision des capteurs et normalisation des charges pour $i = 10$

On remarque pour les essais S12-F3, S6-F3 et AS6-F3 que la pente de la perte de charge est inversée dans les tranches 4 et 5.

Ce phénomène est dû d'une part à la précision des capteurs et d'autre part à la normalisation des charges. Le gradient prévu pour réaliser les essais est de 10 mais lors d'un essai le gradient varie entre 8 à 12. Il a été convenu de normaliser les charges enregistrées pour un gradient de 10.

L'écart de charge entre le capteur du bas et le capteur du filtre est très faible, voire nul. Il arrive que la charge enregistrée dans le filtre soit légèrement supérieure à celle enregistrée par le capteur du bas. Ces écarts de charge sont inférieurs à 2 kPa, ces écarts peuvent être considérés comme non significatifs. Ils sont de l'ordre de grandeur de la précision des capteurs. En normalisant les charges, une différence de 2 kPa peut influencer le pourcentage de pertes de charge de 5 à 12 %. La pente inverse de la perte de charge dans les tranches 4 et 5 est comprise entre 3 et 11%. Elle peut être considérée comme non significative.

5.5.2 La géométrie des cellules

La distance maximale entre deux capteurs consécutifs est de 85 mm, dans la base. Les pertes de charge se faisant essentiellement dans les trois premières tranches, il est possible de mesurer des écarts de pressions significatifs sur de si petites distances. Le

problème se pose entre le capteur du bas et le capteur de filtre. La distance est de 54 mm, la précision des capteurs n'est pas suffisante pour mesurer un écart de charge sur une si petite distance. Une cellule plus longue et des capteurs plus éloignés seraient nécessaires si l'on veut étudier en détail les phénomènes à l'interface.

5.5.3 Le gradient

Un gradient de 10 a été choisi pour :

- accélérer la processus de suffosion s'il a lieu
- étudier la suffosion en commençant par le cas le plus défavorable. Mais s'il n'y a pas de suffosion avec un gradient 10, il n'y en aura pas sur le site où les gradients mesurés sont de l'ordre de 4.

On peut se demander si un tel gradient ne crée pas de phénomènes supplémentaires qui n'ont pas lieu en réalité.

Si nous voulons étudier en détail la filtration de cette moraine, nous devrions revenir à des gradients plus proches de la réalité.

5.5.4 Prélèvement des tranches

Lors du démontage, les tranches (sols et filtres) sont prélevées à l'intérieur des cellules à l'aide d'une cuillère. Le petit diamètre de la cellule ne facilite pas le pelletage. Il est donc impossible de diviser les tranches selon un plan parfait. La présence ou le manque

d'une particule grossière influence l'allure de la courbe granulométrique, comme nous l'avons montré dans les sections précédentes. L'interface sol/filtre est la zone la plus sensible à ce problème. Il n'est pas toujours facile de séparer de façon franche le sol et le filtre. Des particules de sol se retrouvent dans la tranche 4 et vice-versa. Les courbes granulométriques des filtres sont elles aussi influencées par le prélèvement.

5.6 Recommandations

Les conditions expérimentales ont été déterminées en fonction du problème à étudier: la suffosion. Le mandat a été rempli mais des résultats secondaires ont été enregistrés:

- pénétration de particules dans le filtre
- allures des courbes de perte de charge
- pas de production de fines lors du compactage

Les sections précédentes nous montrent que les conditions expérimentales sont limitatives pour une étude poussée de la filtration à l'interface base/filtre.

Le problème majeur reste le rapport grandeur des mesures/ précision du matériel. On pourrait améliorer ces conditions expérimentale et mieux appréhender les phénomènes à l'interface en :

- utilisant un gradient moins fort plus proche de la réalité
- utilisant une cellule plus longue
- espaçant les capteurs pour pouvoir mesurer de faibles pertes de charge à l'interface

- mettant une deuxième rangée de capteurs de pression diamétralement opposée à la première. Les capteurs des 2 lignes seront placés en quinconce
- plaçant un capteur à l'interface côté base.

CHAPITRE 6

SYNTHÈSE ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Les premiers résultats que nous pouvons tirer de ces essais peuvent être divisés en deux parties :

- l'une concernant le potentiel suffosif de la moraine
- l'autre concernant la filtration de la moraine.

L'ensemble des analyses granulométriques réalisées sur les bases ne montrent aucune variation de granulométrie entre les tranches et ce, quelque soit le pourcentage de fines.
(tableau 6.1)

Tableau 6.1 Pourcentages de fines par tranche et par essai

Tranche:	S0-F1	S0-F3	S6-F3 AS6-F3	PS6-F1	PS6-F3	S12-F1 1	S12-F1 2	S12-F3	PS12-F3	APS12-F3
1	0.6	2.4	7.6	6.8	6.9	13.1	12.8	13.2	13.4	12.8
2	0.9	2.4	7.0	7.0	6.6	12.3	13.1	12.9	12.9	13.3
3	0.8	2.5	7.2	6.5	6.7	13.8	12.7	13.0	13.2	13.1
4	0.8	2.5	7.0	6.9	6.5	12.9	13.3	12.9	13.2	13.4

Malgré l'incertitude relative aux capteurs et aux calculs, l'étude de la filtration affiche certaines tendances. Les plus marquées sont l'absence totale de concentration de pertes de charge à l'interface base/filtre et les résultats de l'utilisation du filtre grossier.

L'ouverture de filtration des filtres est supérieure à une fraction granulaire des bases. On a constaté que des particules comprises entre 0 et 0.630 mm ont pénétré dans le filtre grossier sous l'effet des forces d'écoulement. L'étude des courbes de pertes de charge montre une augmentation des pentes des pertes de charge de l'amont vers l'aval. Il s'agit d'une tendance assez marquée. Les écarts entre la perte de charge linéaire et les courbes des essais sont supérieurs ou égaux à la précision du système.

Ce phénomène s'apparente à ce que Lafleur, Eichenauer et Werner (1996) ont nommé du Bridging : pontage (section 2.2.2). On doit tout de même relativiser cette interprétation car le phénomène n'est pas accompagné par une perte significative de particules dans les tranches 4 des bases. Seul l'essai S12-F3 montre une perte minime de fines dans la tranche 4. Les quantités de particules mesurées en excès dans le filtre sont infimes. Un excès de 3.4 % de particules dans le filtre devrait se traduire par une perte de 1.8 % dans la tranche 4, ce qui est inférieur à la précision du tamisage. Si la pénétration de particules ne peut pas être quantifiée de façon certaine, elle est bien réelle et nous indique qu'il existe une interaction base/filtre.

L'influence du filtre fin sur la filtration est moins nette. Deux essais sur trois affichent une perte de charge quasi-linéaire entre l'amont et l'aval. Comme pour le filtre grossier,

on remarque qu'il y a pénétration de particules mais en quantité moindre. Là aussi la pénétration est indicative.

Le filtre semble donc avoir une influence sur la filtration.

Il y a des écarts entre la granulométrie visée du filtre et celle mesurée après les essais dans les fractions moyennes et grossières. Cela rend compte de la difficulté rencontrée pour prélever les tranches et pour préparer les filtres.

L'analyse de toutes les courbes de pertes de charge nous montre :

- qu'il n'y a pas, ou très peu, de perte de charge dans les tranches 4 et 5.
- qu'il y a perte de charge dans la tranche 6.

La précision des capteurs ne permet pas de mesurer de faibles variations de pressions. La proximité des capteurs ne facilite pas la mesure de ces variations dans la tranche 4

En aval, la tranche 6 subit l'influence de la pierre poreuse. Lors du démontage des essais, nous avons constaté à plusieurs reprises que la pierre poreuse était sale.

L'ouverture de filtration de la pierre poreuse étant très petite (11 μm), la pierre retient toutes les particules y compris les fines qui même en quantité infime, obstruent la pierre poreuse et créent des pertes de charge. Ces fines peuvent être attribuées à la pénétration.

Des résultats secondaires peuvent être signalés. Le piston n'a pas eu d'influence sur les résultats. Le compactage des bases et de la moraine naturelle ne crée pas de fines.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

Le but de cette recherche était double:

- définir le potentiel suffosif de la moraine de LG4
- affirmer ou infirmer la responsabilité de la suffosion dans la concentration des pertes de charge à l'aval du noyau de LG4.

Après avoir indiqué la cause de cette recherche et rappelé les bases théoriques de la suffosion et de la filtration, on a présenté la méthode expérimentale employée pour atteindre notre but. Les résultats ont été présentés et analysés. Cette analyse va permettre de conclure.

Les résultats n'ont montré aucune variation granulométrique entre les tranches, et ce quelque soit le pourcentage de fines. On a aussi constaté qu'il n'y a jamais eu concentration de pertes de charge à l'interface base/filtre.

Dans tous les cas, la stabilité avait été prédite par la méthode de Kenney et Lau. Même si les sols testés par Kenney et Lau ne contenaient pas de fines, ils étaient non cohérents comme la moraine de LG4. Cette théorie peut donc être utilisée pour prédire la stabilité de sols non cohérents, quelle que soit la granulométrie.

Les critères géométriques prennent ici toute leur importance . On se rend compte que même avec des conditions hydrauliques sévères, ils régissent la prédiction de la stabilité. Un autre point très important doit être souligné, la prise en compte de l'allure de la courbe granulométrique est un facteur essentiel dans la prédiction de la stabilité. Toute méthode qui occulte ce paramètre, telle que celle de Burenkova, ne donne pas de résultats satisfaisants.

Tableau 7.1 Synthèse des résultats

Essais	Burenkova	Résultats	Kenney et Lau
S12-F1	Instable	Stable	Stable
S12-F3	Instable	Stable	Stable
PS12-F3	Instable	Stable	Stable
APS12-F3	Instable	Stable	Stable
PS6-F1	Instable	Stable	Stable
PS6-F3	Instable	Stable	Stable
S6-F3	Instable	Stable	Stable
AS6-F3	Instable	Stable	Stable

Comme on en a discuté au chapitre 2, il faut tenir compte des déficits granulométriques. Ces déficits influent directement sur la distribution des tailles des constriction, qui elles mêmes retiennent ou pas les particules.

On se rappelle que dans cette étude, seul le pourcentage de fines a varié. Si la moraine présente à un endroit donné un déficit granulaire, il faut s'assurer qu'il ne puisse pas engendrer de la suffosion. La courbe granulométrique de la moraine mise en place doit être contrôlée.

En extrapolant ces résultats et ceux de Loungnarath et Lafleur (1996) on peut dire que:

- la moraine employée à LG4 est stable
- la suffosion n'est pas la cause de la concentration des pertes de charge à l'aval du noyau de LG4.

Il pourrait être intéressant de s'interroger au sujet du rapport $d/4d$ que préconisent Kenney et Lau. Ce rapport est plus petit que celui obtenu par la relation géométrique et celui de Terzaghi.

Malgré les restrictions dues au matériel (section 5.5), l'étude de la filtration a mis en évidence la pénétration de particules fines dans les filtres et l'augmentation des pentes des pertes de charge de l'amont vers l'aval. On peut supposer qu'il se crée un phénomène de pontage à l'interface base/filtre. En poussant un peu plus loin notre analyse, on se rend compte que même si la base est stable, il peut y avoir migration de particules à l'interface base/filtre. Il ne s'agit pas de suffosion mais de migration de particules d'un sol vers un autre sol plus ouvert. Cela remet en cause le critère de

retention de Terzaghi. On a vu dans le tableau 3.5 que les critères étaient respectés, mais les essais montrent des résultats qui tendent à prouver le contraire. Cela montre aussi qu'il peut y avoir migration de particules entre la base et le filtre et ce, même si la base est stable. Deux catalyseurs sont nécessaires:

- des forces d'écoulement
- un sol adjacent plus ouvert

L'étude de ces phénomènes reste délicate. On a vu que les quantités de particules migrantes sont très petites. La quantification de ces particules est très difficile avec la méthode de tamisage conventionnelle. Malheureusement il n'existe pas d'autres moyens. Il faut donc se montrer très méticuleux et entretenir un matériel de tamisage en parfait état, à savoir des tamis très propres et des temps de tamisage suffisants pour séparer les fractions sans qu'il y ait de résidus. Il faut se montrer plus restrictif que la norme qui stipule qu'un tamisage est terminé lorsque moins d'un pour-cent de la masse passe au travers du tamis en une minute.

On peut enfin ajouter qu'il n'y a pas de création de fines lors du compactage des moraines du dépôt 6 de LG4, contrairement à ce qui a été écrit dans le rapport Loungnarath et Lafleur (1996).

BIBLIOGRAPHIE

- ATMADZIDIS, D. (1987). An experimental study of sand migration in gravel. Neuvième Congrès Européen de mécanique des sols et des travaux de fondation, Dublin, 887-890.
- AUVINET, G. & BOUVARD, D. (1983). Effet d'échelle géométrique dans les milieux granulaires. Revue Française de Géotechnique, (vol. 25), 63-69.
- BLACK, D.K. & LEE, K.L. (1973). Saturating laboratory samples by back pressure. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 99, 75-93.
- BOWLES, J.E (1996). Foundation Analysis and Design, cinquième édition. Edition McGraw-Hill, 1173 p.
- BURENKOVA, V.V. (1993). Assessment of suffosion in non-cohesive and graded soils. In: Brauns, Heibaum, Schuler: Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Balkema, Rotterdam, 357-360
- CHAPUIS, R. (1992). Similarity of internal stability for granular soils. Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, no 4, 711-713.
- DASCAL O. (1984). Peculiar behaviour of the Manicouagan 3 dam's core. Proceedings International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 561-567.

FRY, J.J., FLAVIGNY, E. & TAQUET, B. (1987). Lois de perméabilité dans les barrages en terres grossières. Neuvième Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Dublin, 39-42.

Grand Larousse Encyclopédique, (1962) en 10 volumes. Edition Librairie Larousse, Volume 6 p 149.

HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Traduite par M. Jean Lafleur, 808 p.

KOVACS, G. (1981). Developpments in water science-Seepage hydraulics. Elsevier North-Holland, Inc., New York, 730 p.

KENNEY, T.C. & LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, no 2, 215-225.

LAFLEUR, J. (1984). Filter testing of broadly graded cohesionless tills. Canadian Geotechnical Journal, vol. 21, 634-643.

LAFLEUR, J. (1995). Pressions interstiellles dans les noyaux de barrage en till compacté. Proposition de recherche, École Polytechnique de Montréal, 8 p.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. & ROLLIN, A. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No 12, 1747-1768.

LAFLEUR, J., EICHENAUER, T. & WERNER, G. (1996). Geotextile filter retention criteria for well graded cohesionless soils. Proc. GEOFILTERS'96 Conference, Montreal, Canada, edited by Lafleur & Rollin, pp 429-438.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. & ROLLIN, A. (1993). Filter criteria for well graded cohesionless soils. Proceedings of the First International Conference "Geofilters", Germany, 97-106.

LEGRAND, C. (1989). Notes de cours de géotechnique. I.U.T.de Génie civil-Université des sciences Paul-Sabatier de Toulouse, 289 p.

LEONARDS. G.A. (1968). Les Fondations. Edition Dunod, Paris, 1105 p.

LÖFQUIST. B. (1992). Hydraulic penetration in embankment dams. Ground Engineering, juin 1992, 40-43.

LOUGNARATH. A.M.: LAFLEUR, J. (1996). Stabilité interne des moraines compactées utilisées dans les noyaux de barrages. Centre de Développement Technique (C.D.T) Ecole Polytechnique de Montréal, 194 p.

LOWE, R.D. & JOHNSON, T.C. (1960). Use of back-pressure to increase degree of saturation on triaxial test specimens. A.S.C.E. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado, 819 p.

The Oxford English Dictionary; (1970) en 10 volumes. 3^e édition, édité par l'université d'Oxford. . Volume 10 p110.

PARÉ, J.J.. LAROCQUE, G.S. & SCHNEEBERGER, C.E. (1978). Design of earth-and rockfill dams for La Grande. Water Power and Dams Construction, 38-45.

QUICHERAT, L., DAVELUY, A. & CHATELAIN, (1922). Dictionnaire Latin-Français. Librairie Hachette; 1515 p.

QUICHERAT, L., DAVELUY, A. & CHATELAIN, (1891). Dictionnaire Français-Latin. Librairie Hachette; 1551 p.

RIVIÈRE, A.(1977). Méthodes granulométriques-Techniques et interprétations. Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan, 170 p.

Le Robert Langue Française; (1988) en 10 volumes. Edition les Dictionnaires Le Robert; Volume 9 p 14.

SAINT-ARNAUD, G. (1995). The high pore pressures within embankment dams: an unsaturated soil approach. Canadian Geotechnical Journal, vol. 32, no 5, 892-898.

SAINT-ARNAUD, G., MOREL, R. & HAMMAMJI, Y. (1996). Degree of saturation within till dykes after 30 years of operation. , Comptes Rendus de la Conférence "Geofilters", Montréal, 307-315.

- SAINT-ARNAUD, G. (1996). L'influence du degré de saturation sur l'écoulement dans les barrages en remblai d'Hydro-Québec. Rapport interne présenté à la 20ème réunion du Comité de révision de la Sécurité des barrages d'Hydro-Québec.
- SCHULER, U. (1995). How to deal with the problem of suffosion. Research and development in the field of dams-SNCLD, Crans-Montana, Switzerland, 15 p.
- S.E.B.J. (1987). Le complexe hydro-électrique de La Grande Rivière-Réalisation de la première phase. Éditions de la Chenelière, 496 p.
- SHERARD, J.L. (1979). Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. Treizième Congrès International des Grands Barrages, New Delhi. 25-35.
- SHERARD, J.L. (1989). & DUNNIGAN, L.P. (1989). Critical filters for impervious soils. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, no 7, 927-947.
- SIERAKOWSKI, C. (1994). Internal behaviour of the LG4 dams. Rapport interne d'Hydro-Québec, Division Maintenance et Sécurité des Barrages, 16 p.
- STEWART, R.A., IMRIE, A.S. & HAWSON, H.H. (1990). Unusual behaviour of the core at WAC Bennett dam. Quarante-troisième Conférence Canadienne de Géotechnique, Québec, 549-558.

TERZAGHI, K. & PECK, R.B.(1957). Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Dunod éditeur, Paris, traduit par J. Baudillard et C. Maunier, 565 p.

UNITED STATES STEEL, (1975). Steel Sheet Piling Design Manual. Edité par l'United States Steel, 134 p.

VERMA, N.S., PARE, J.J., BONCOMPAIN, B., GARNEAU, R. & RATTUE, A. (1985). Behaviour of the LG4 main dam. Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol iv, San Francisco, 2049-2054.

ASTM, D-698 (1990). Standard test methods for moisture-density relations of soils and soil-aggregate mixtures using 5.5-lb (2.49-kg) rammer and 12-in. (305 mm) drop, 162-166.

ASTM, D-2434 (1993). Standard test method for permeability of granular soils (constant head). 191-195.

ASTM, D-4318 (1991). Standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. 608-617.

BNQ (Bureau des normes du Québec). Granulats-Réduction des échantillons pour essais en laboratoire. 8 p.

ANNEXE A

**Résultats des essais faits
sur le sol à 0 % de fines**

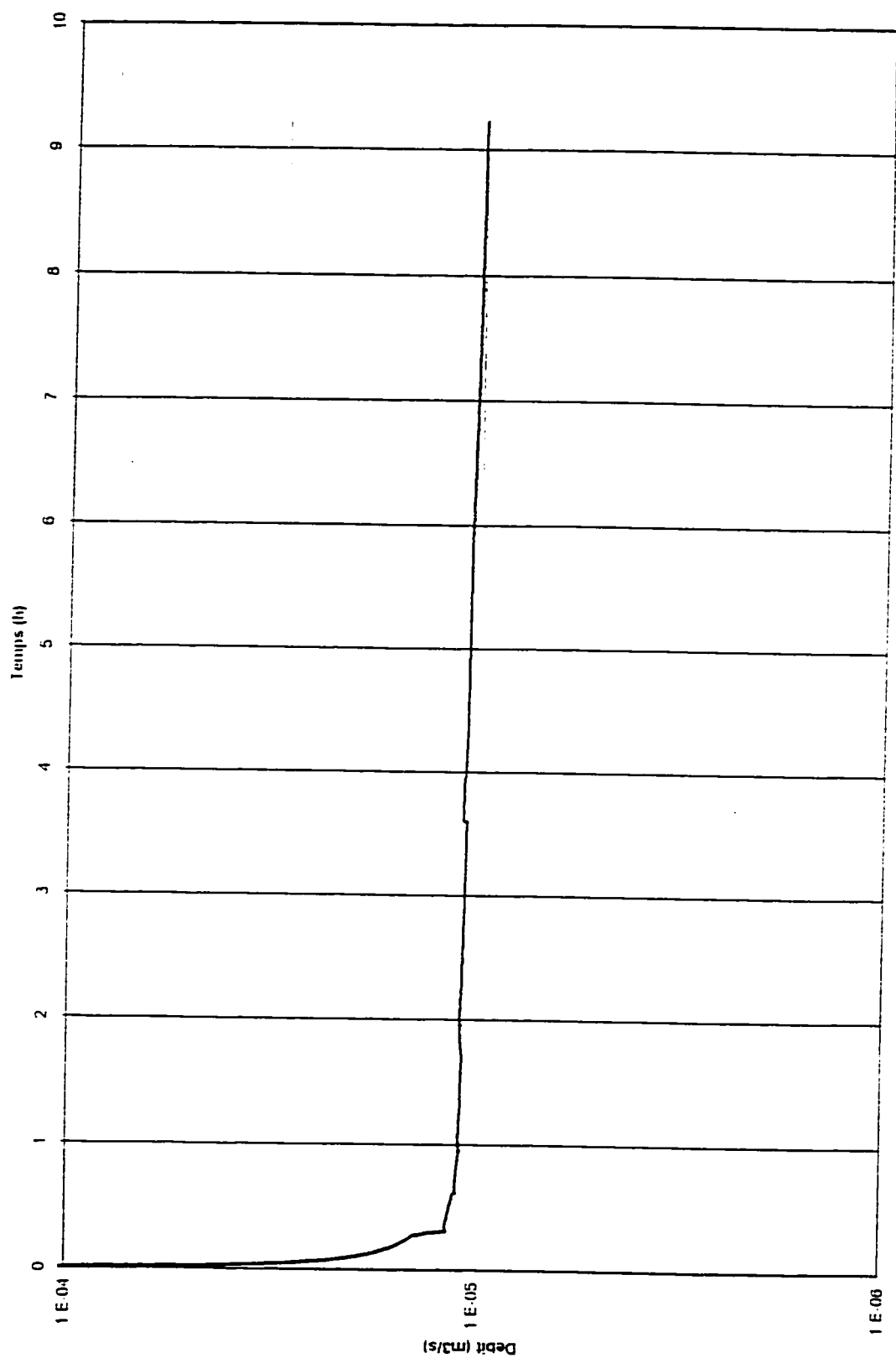


Figure A.1.1. Débit en fonction du temps pour l'essai S0-F1

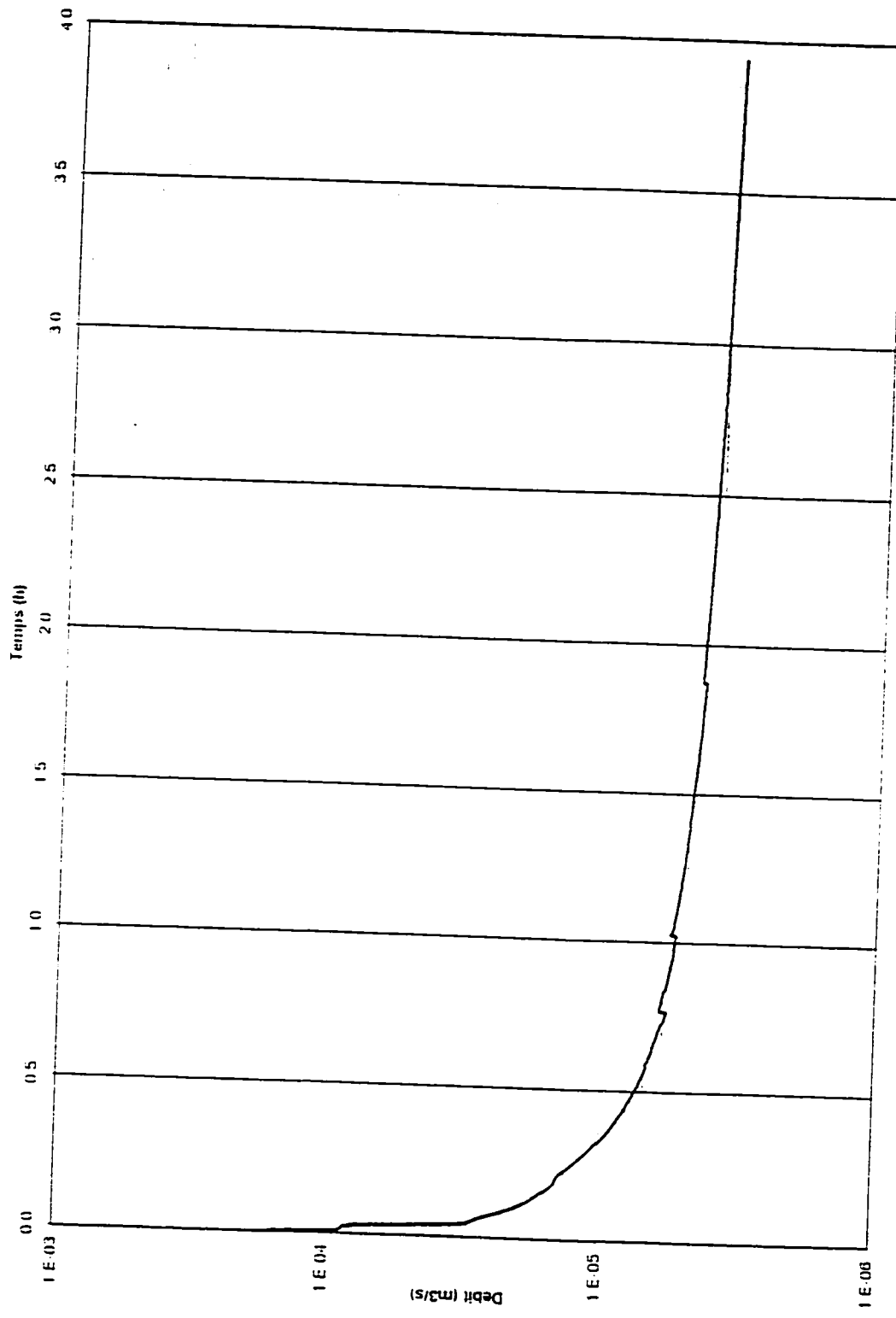


Figure A.2. Débit en fonction du temps pour l'essai S0-F3

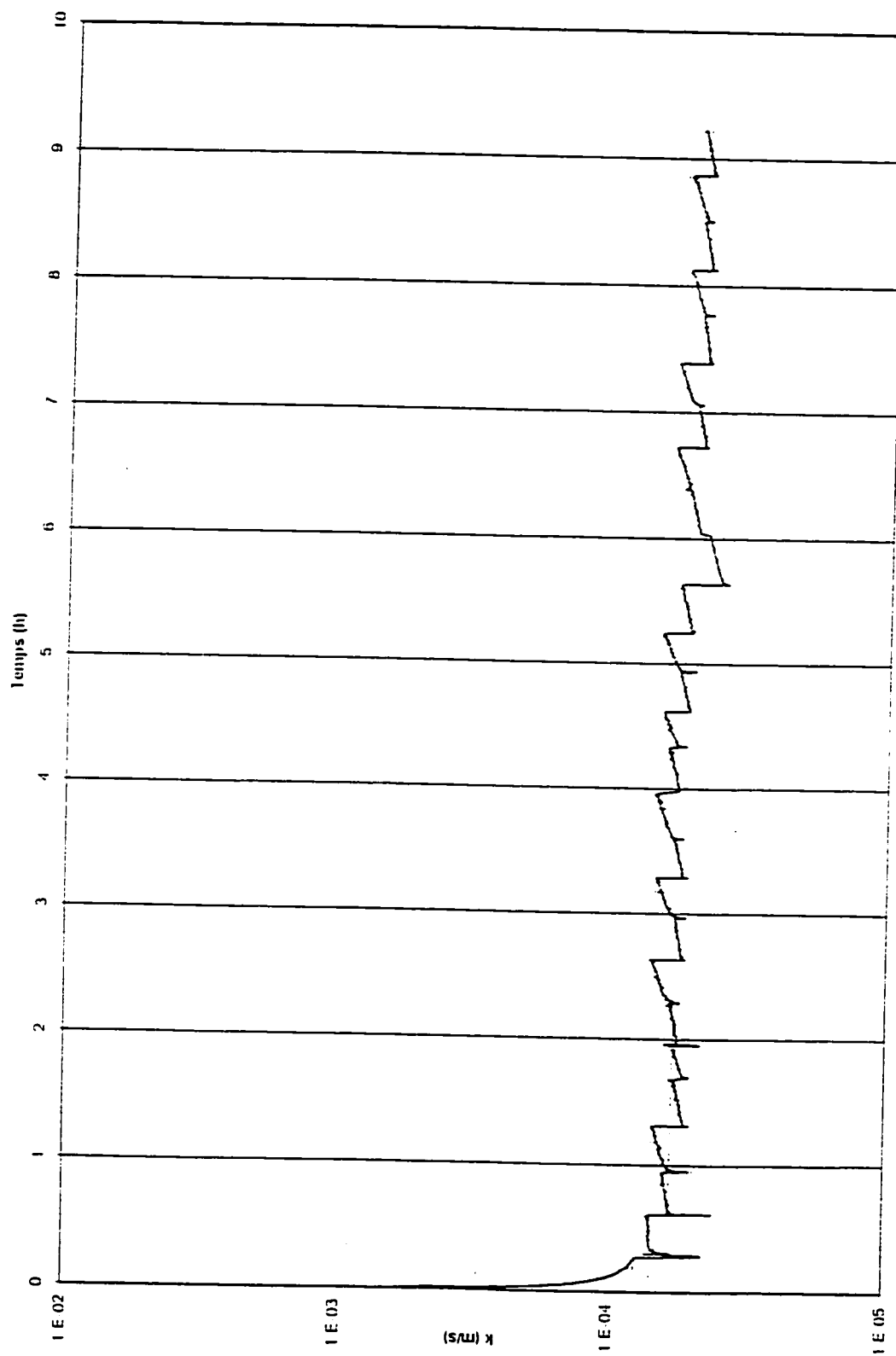


Figure A.3. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S0-F1

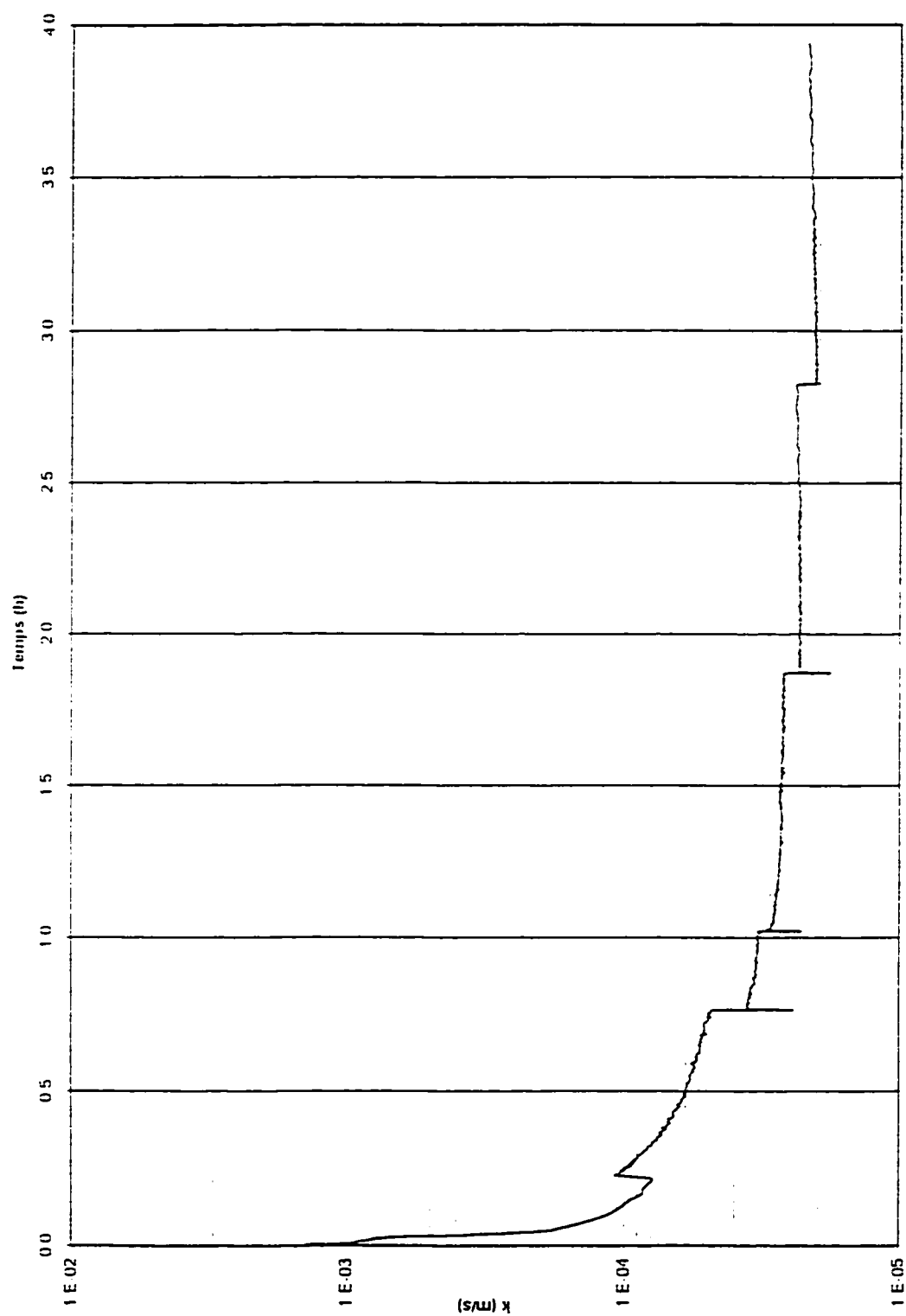


Figure A.4. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S0-F3

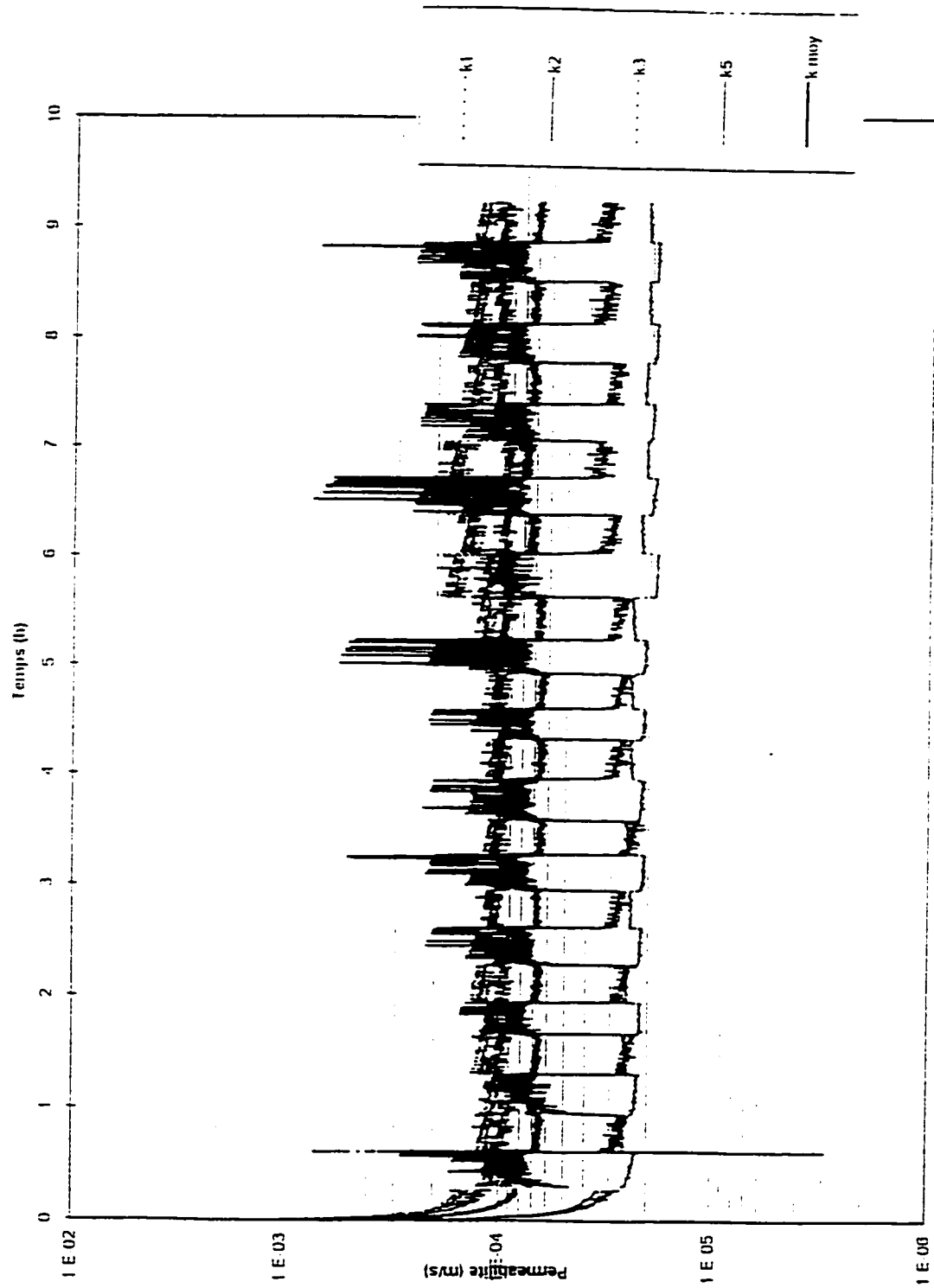


Figure A.5. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S0-F1

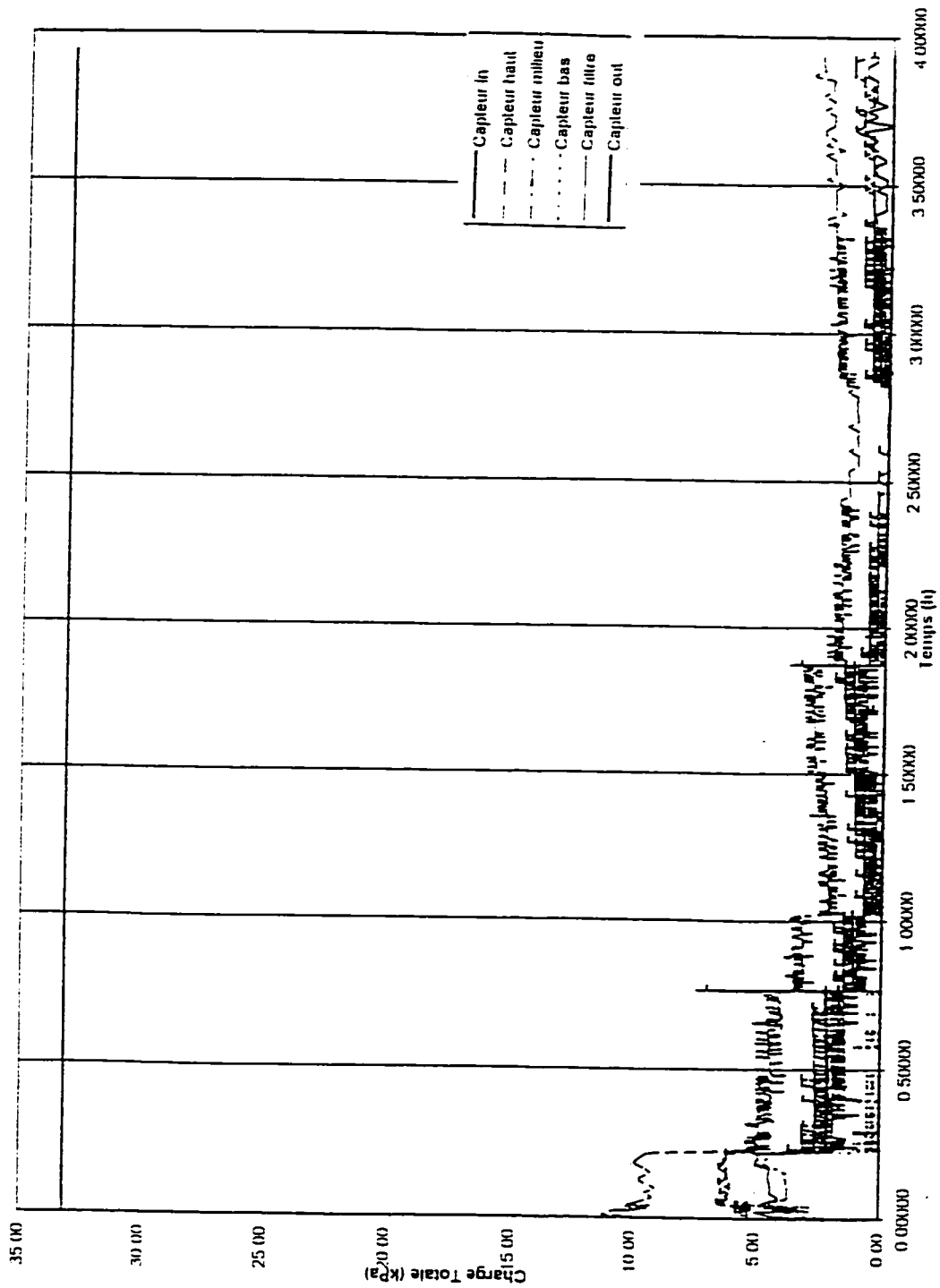


Figure A.6. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S0-F3

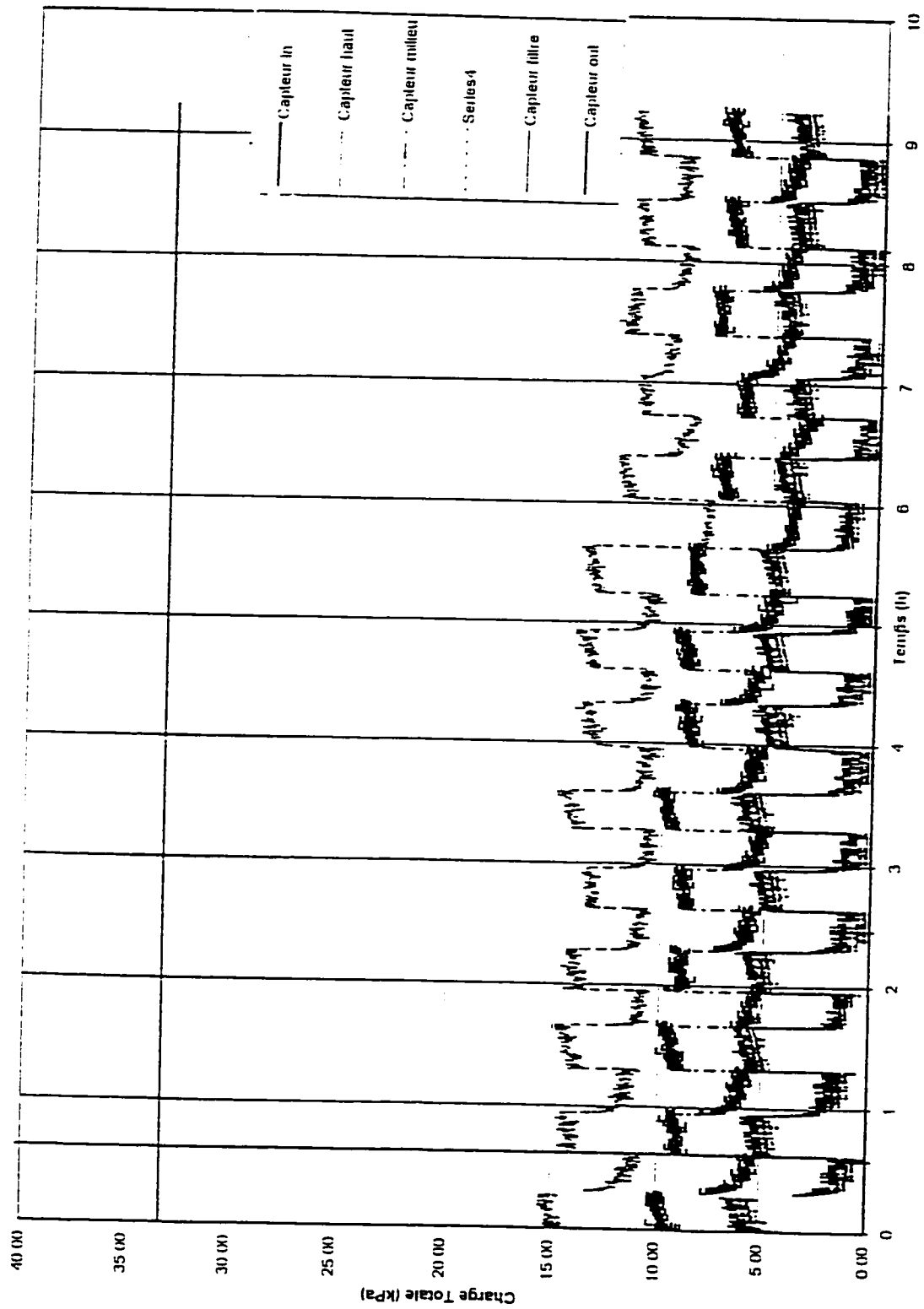


Figure A.7. Charges totales en fonction du temps pour l'essai S0-F1

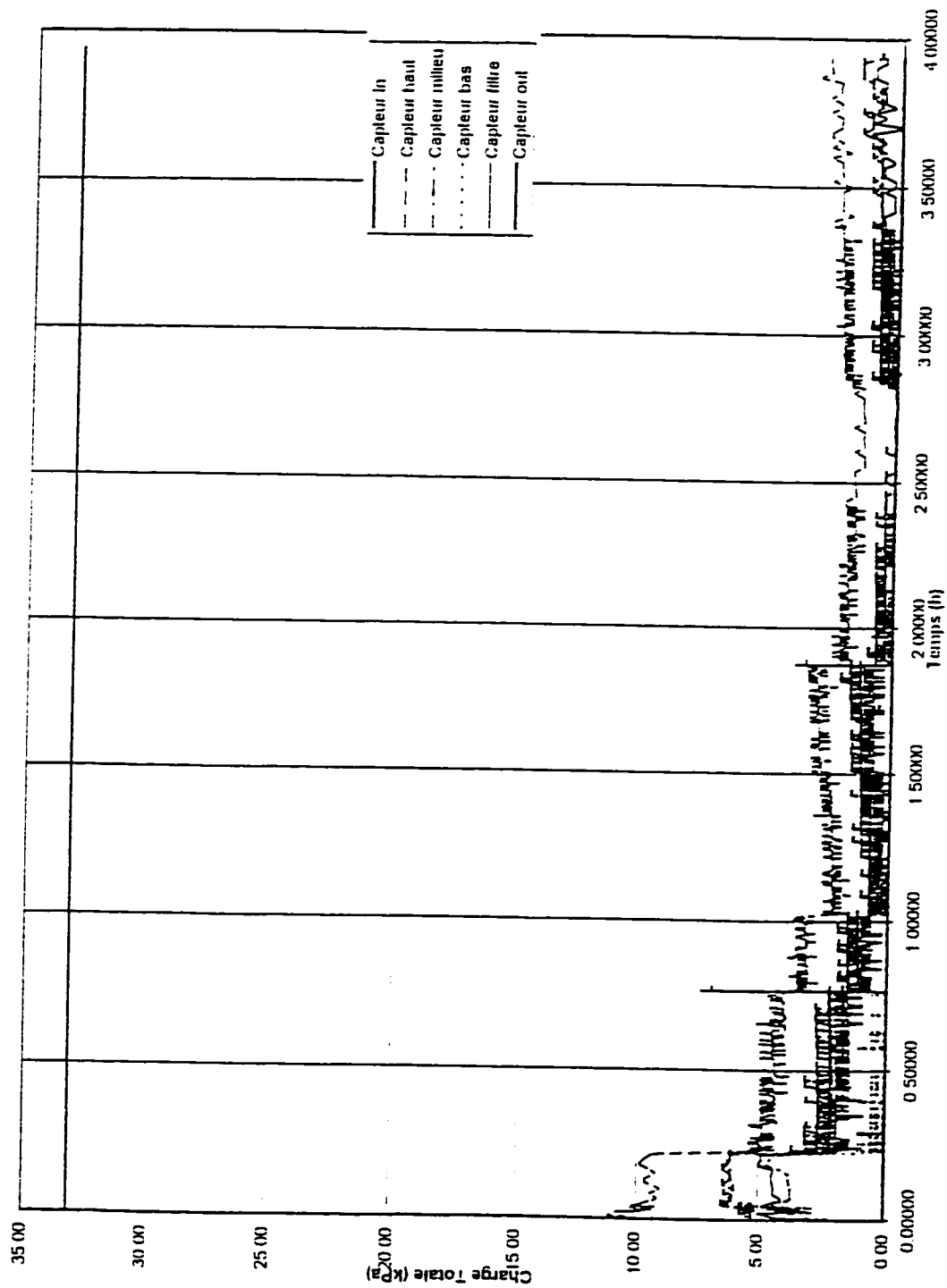


Figure A.8. Charges totales en fonction du temps pour l'essai S0-F3

ANNEXE B

**Résultats des essais faits
sur le sol à 12 % de fines**

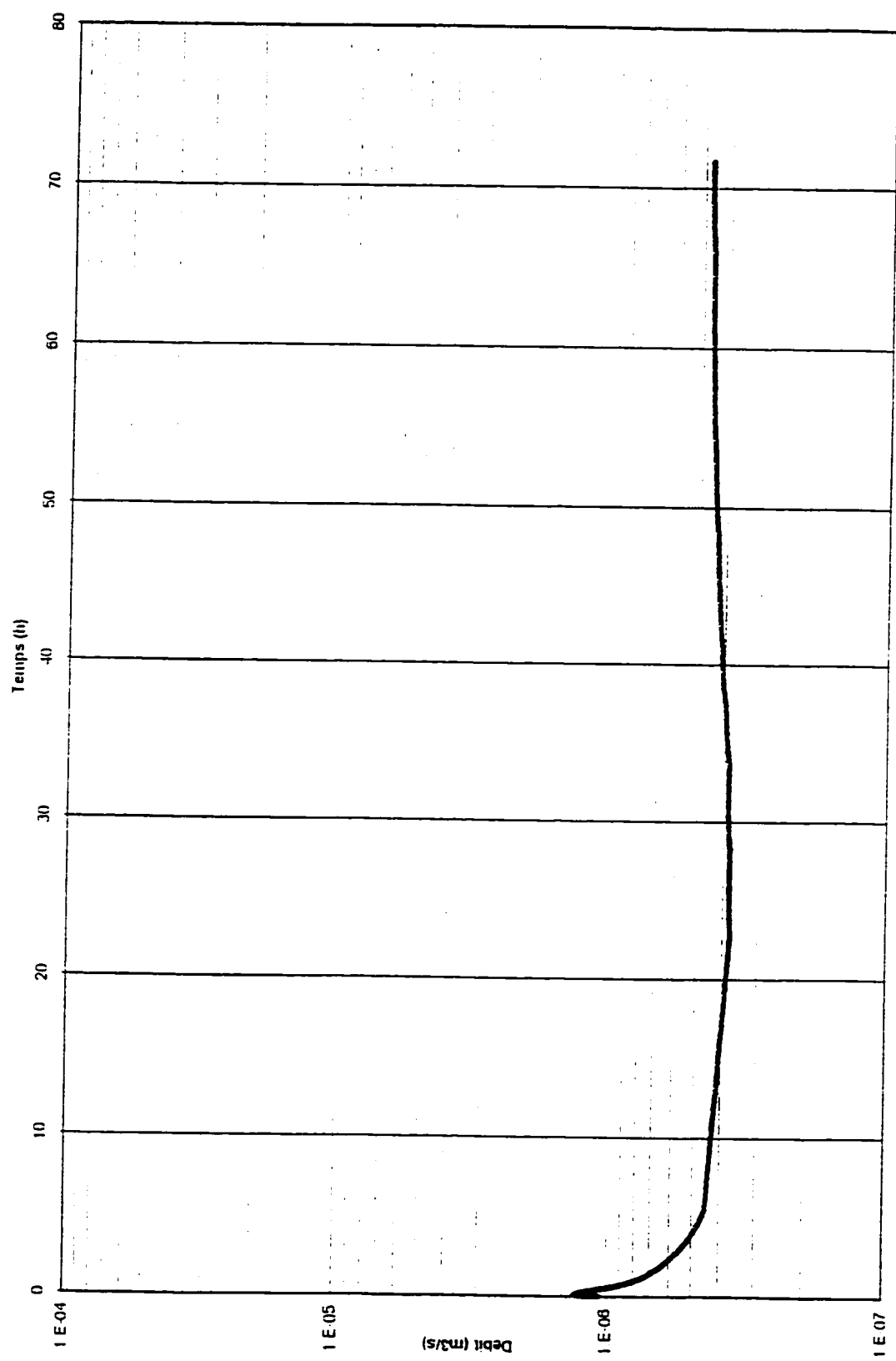


Figure B.1.1. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)

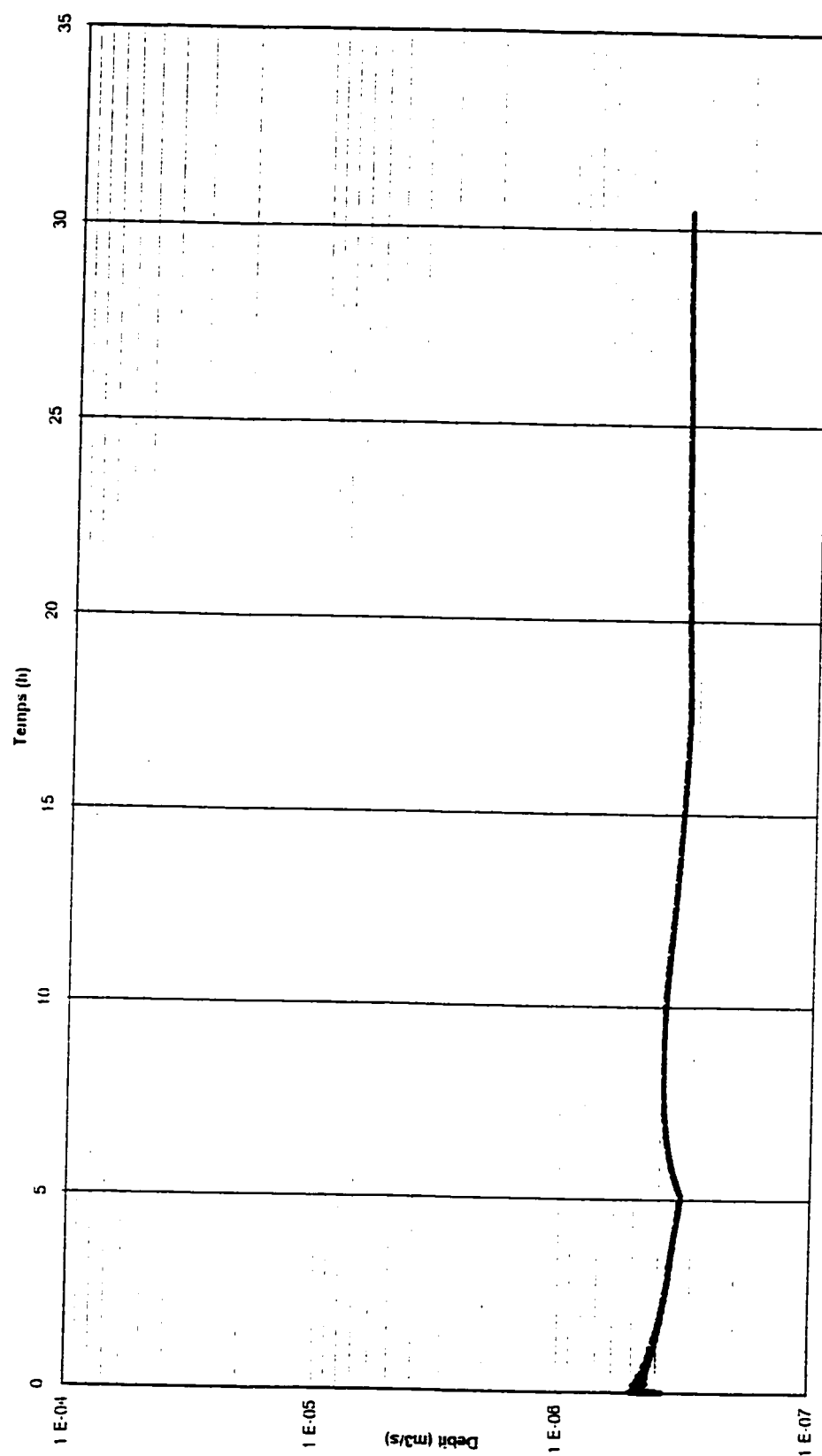


Figure B.2. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)

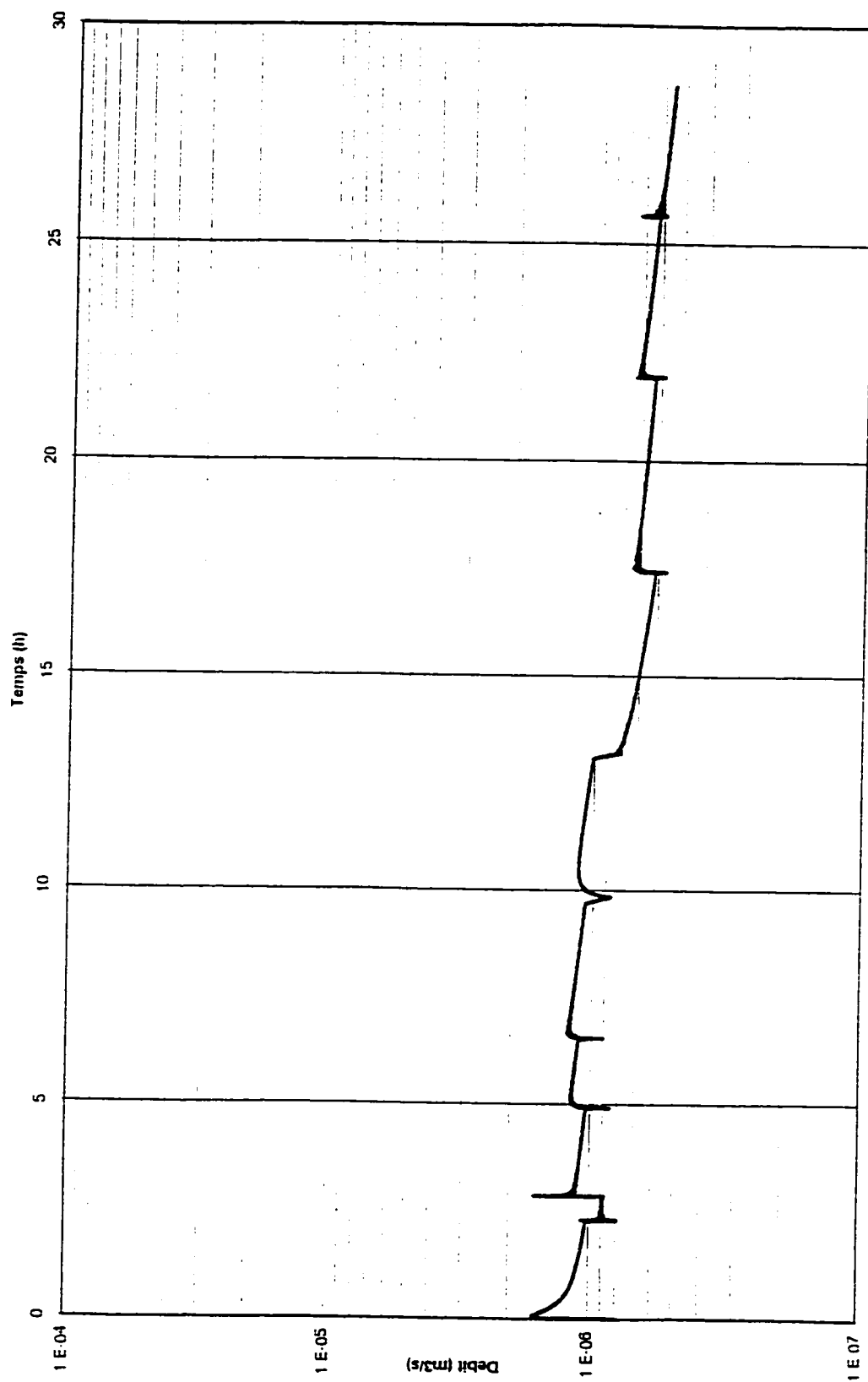


Figure B.3. Débit en fonction du temps pour l'essai S12-F3

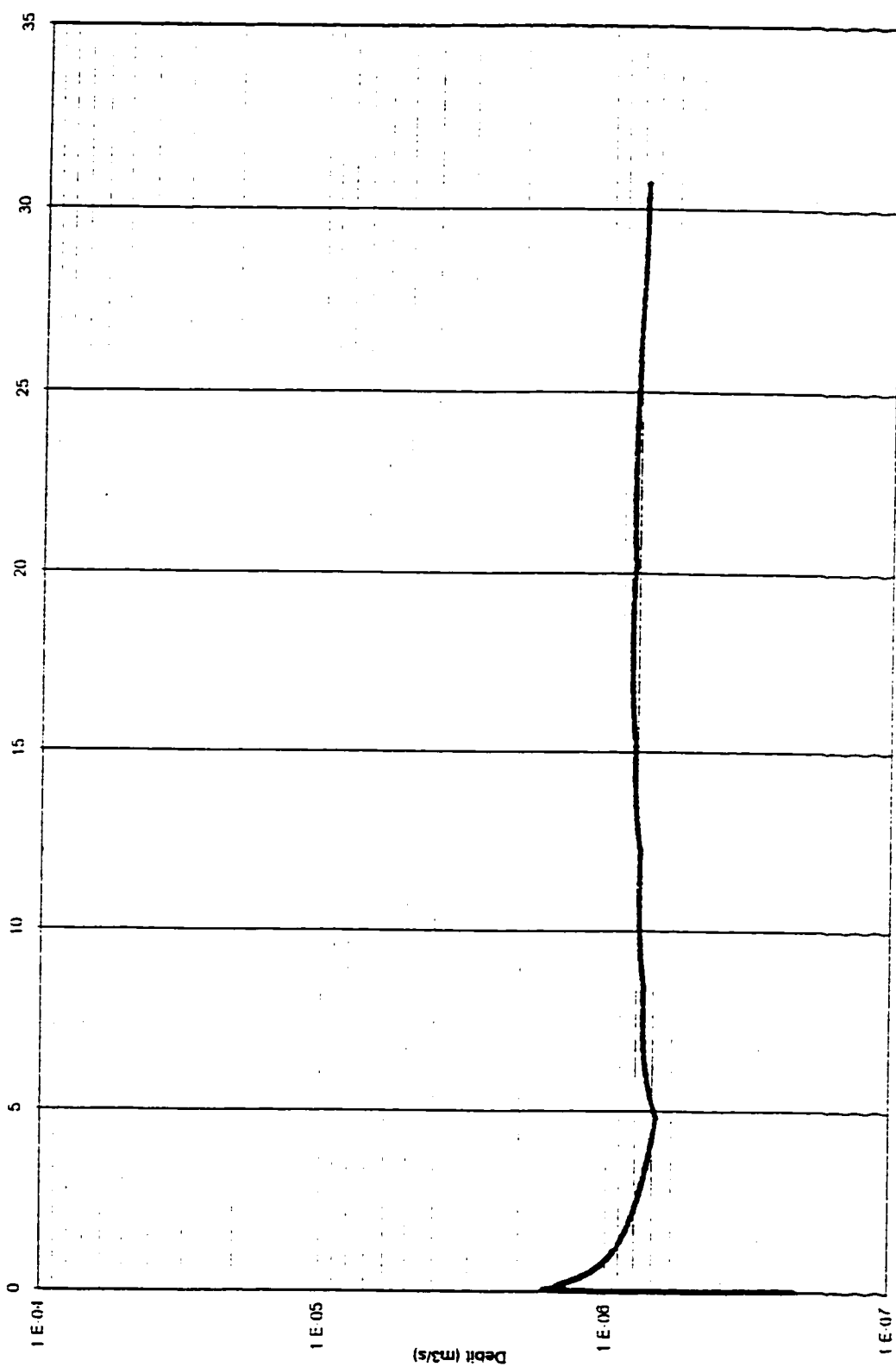


Figure B.4. Débit en fonction du temps pour l'essai PS12-F3

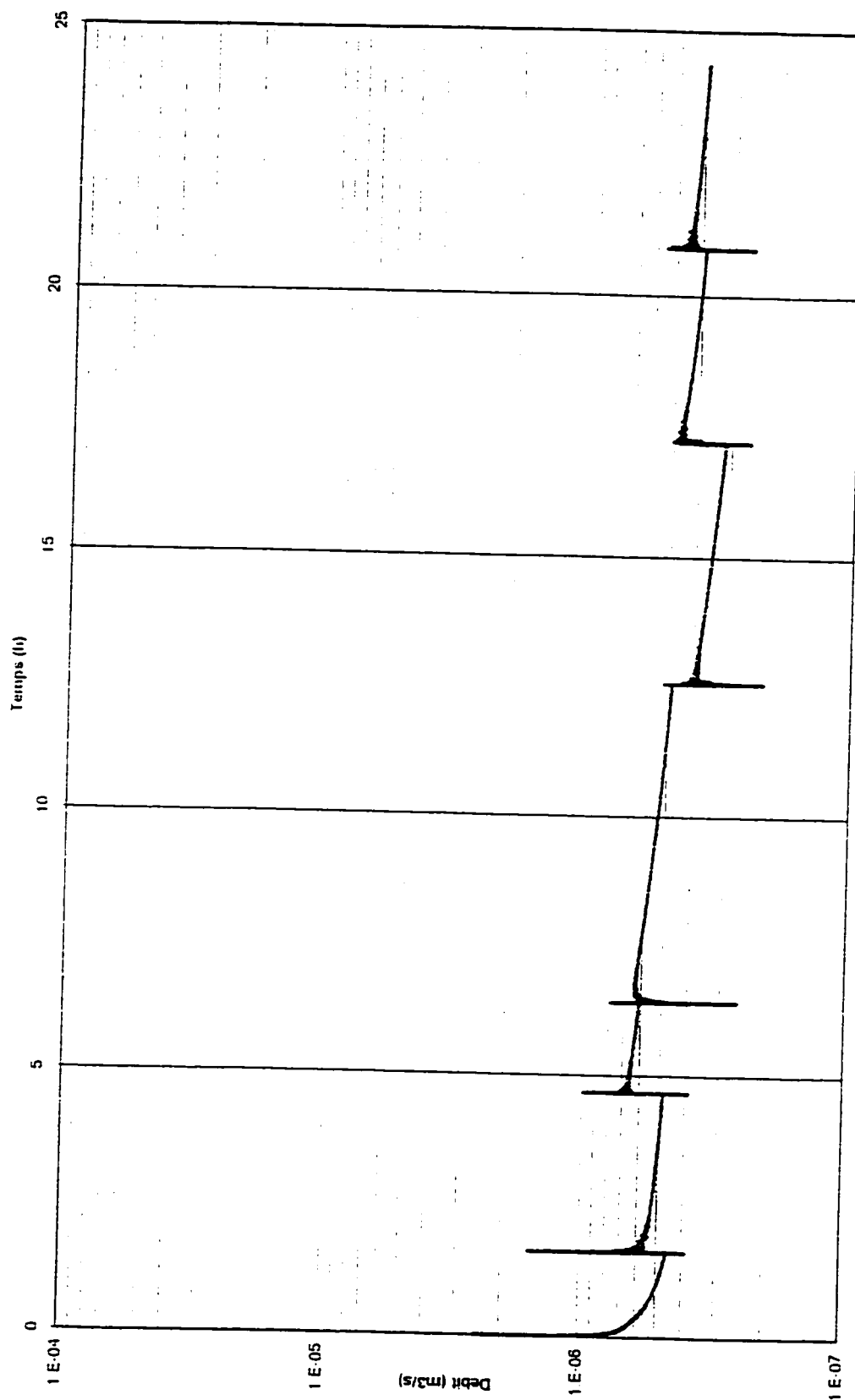


Figure B.5. Débit en fonction du temps pour l'essai APS12-F3

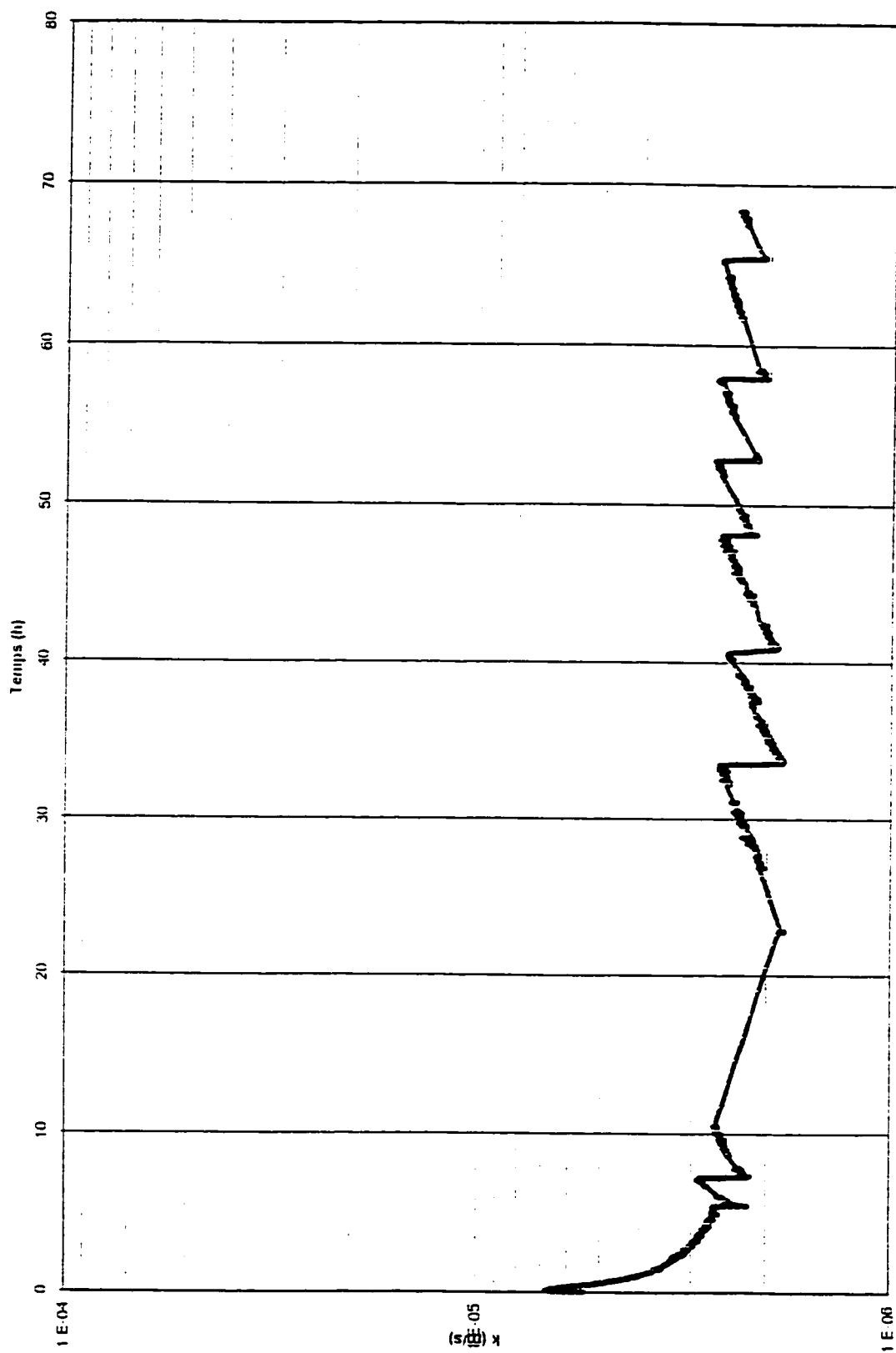


Figure B.6. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)

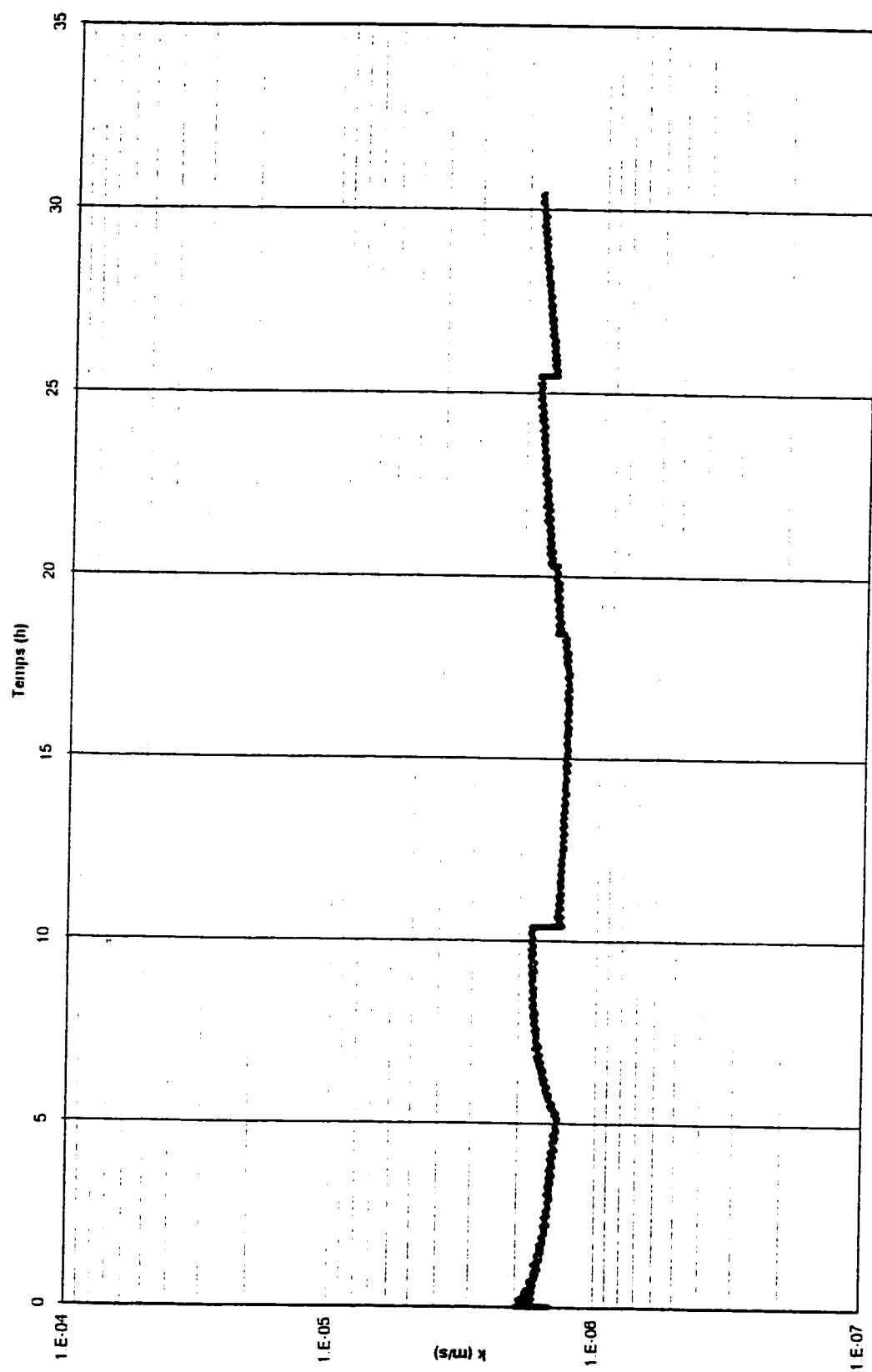


Figure B.7. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)

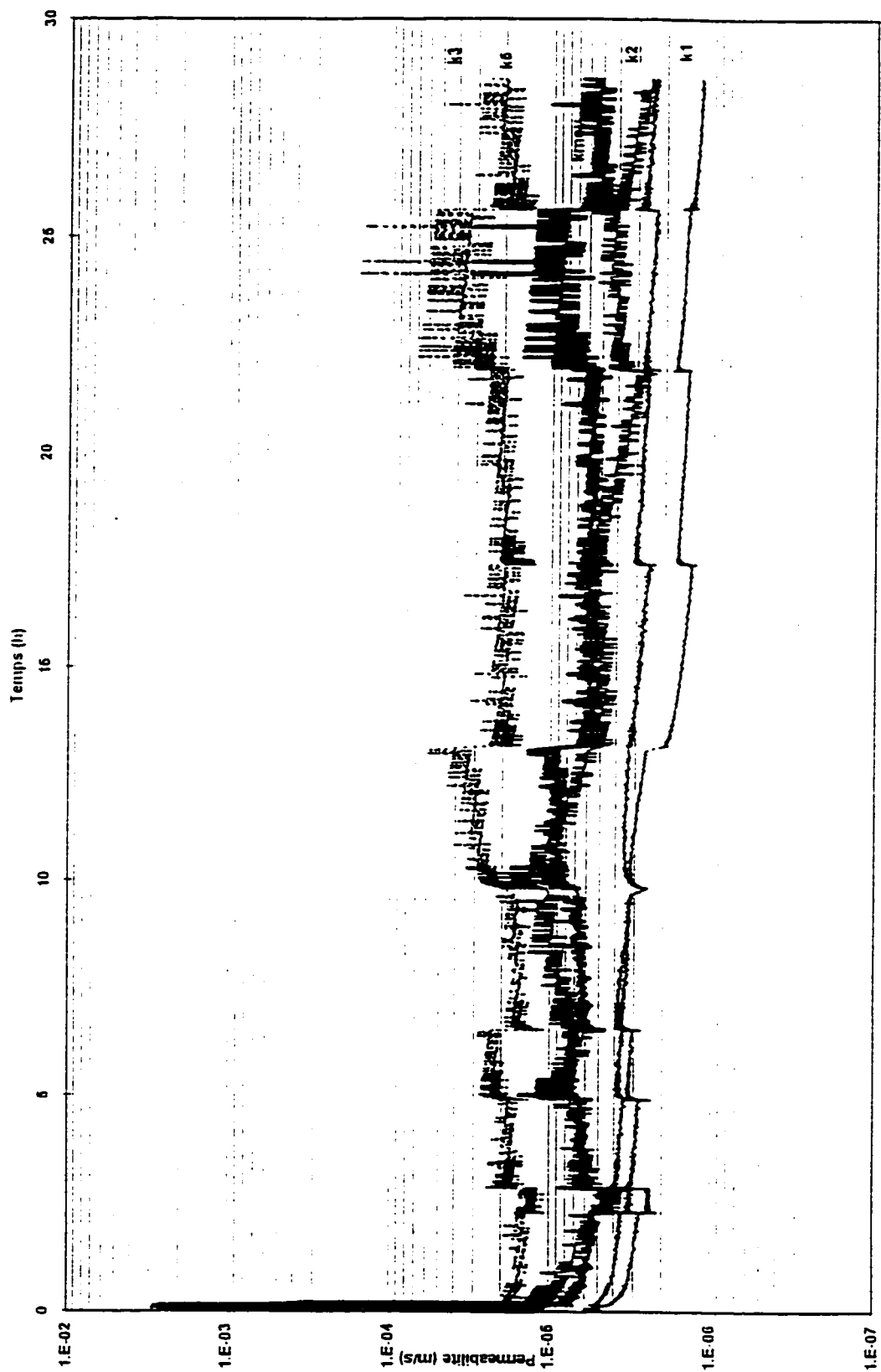


Figure B.8. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S12-F3

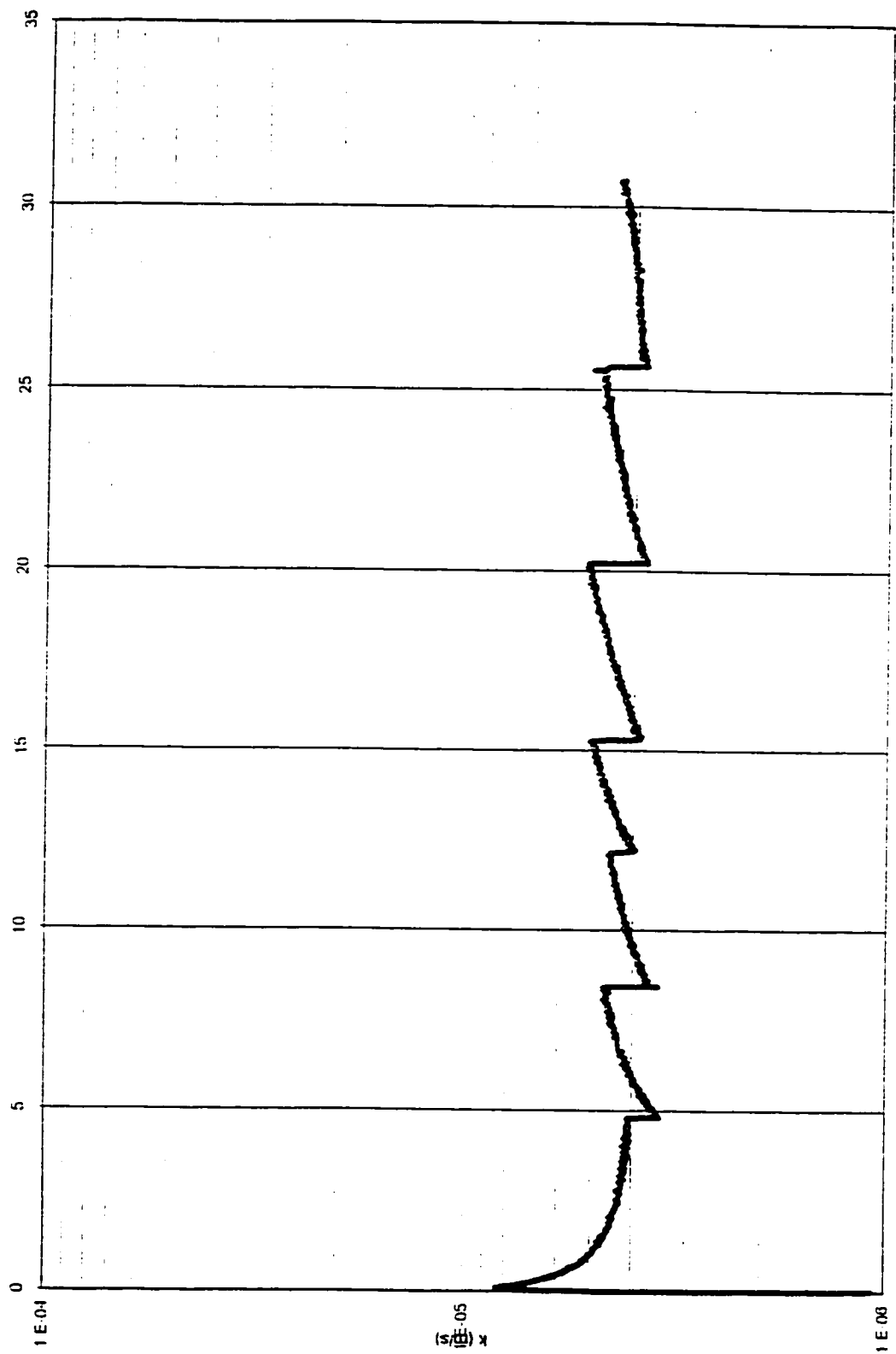


Figure B.9. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS12-F3

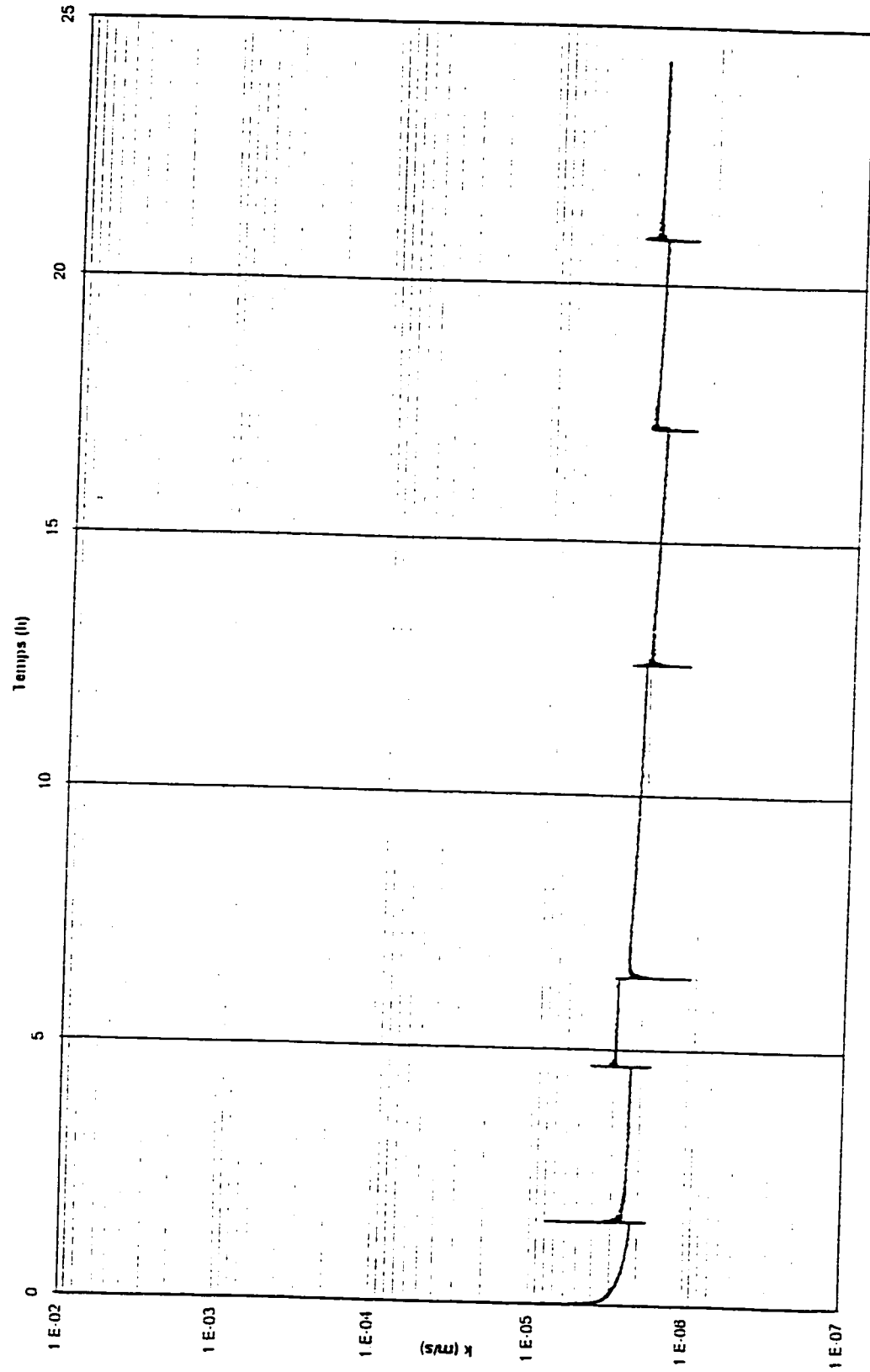


Figure B.10. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai APS12-F3

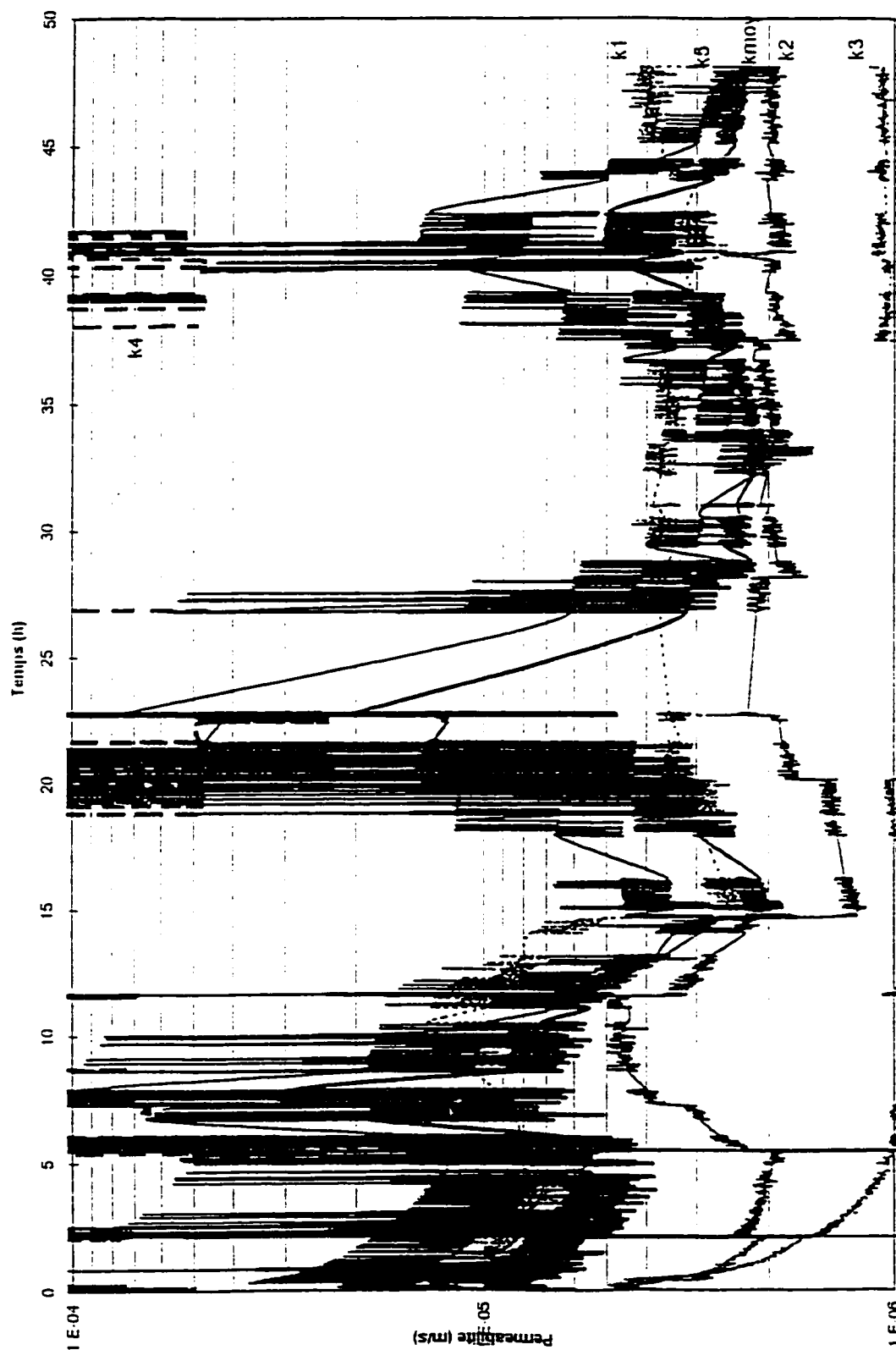


Figure B.11. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)

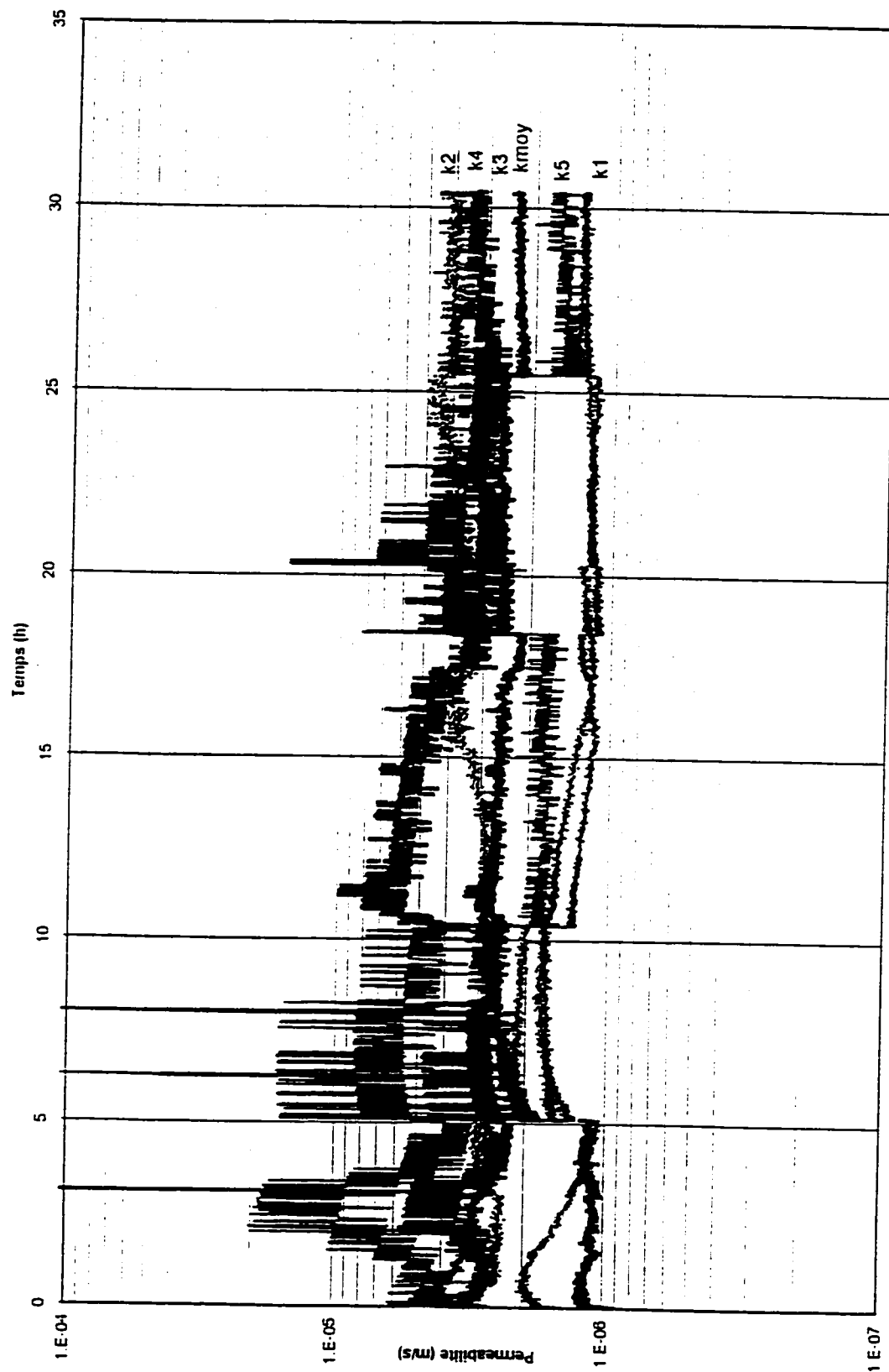


Figure B.12. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)

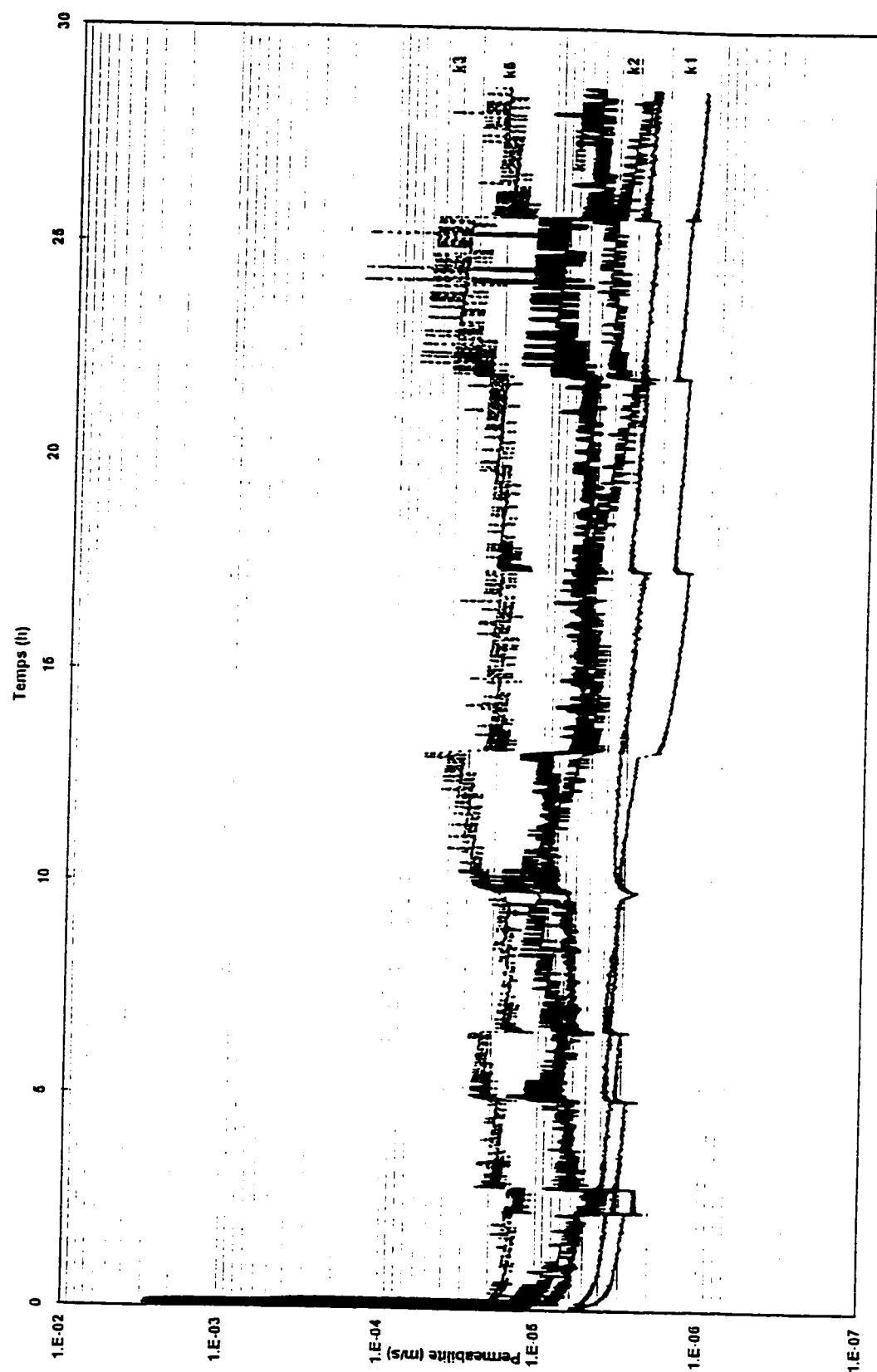


Figure B.13. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S12-F3

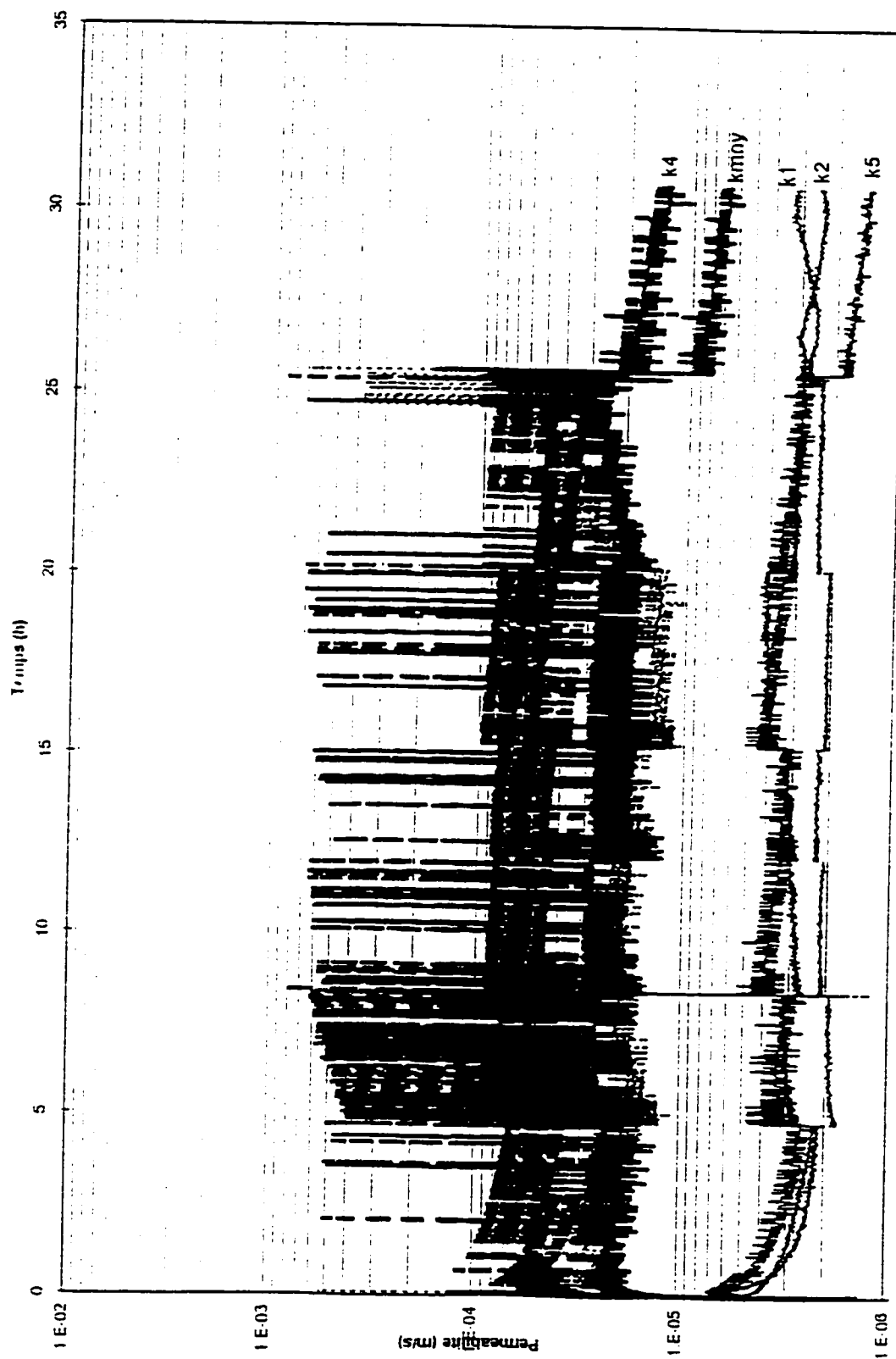


Figure B.14. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS12-F3

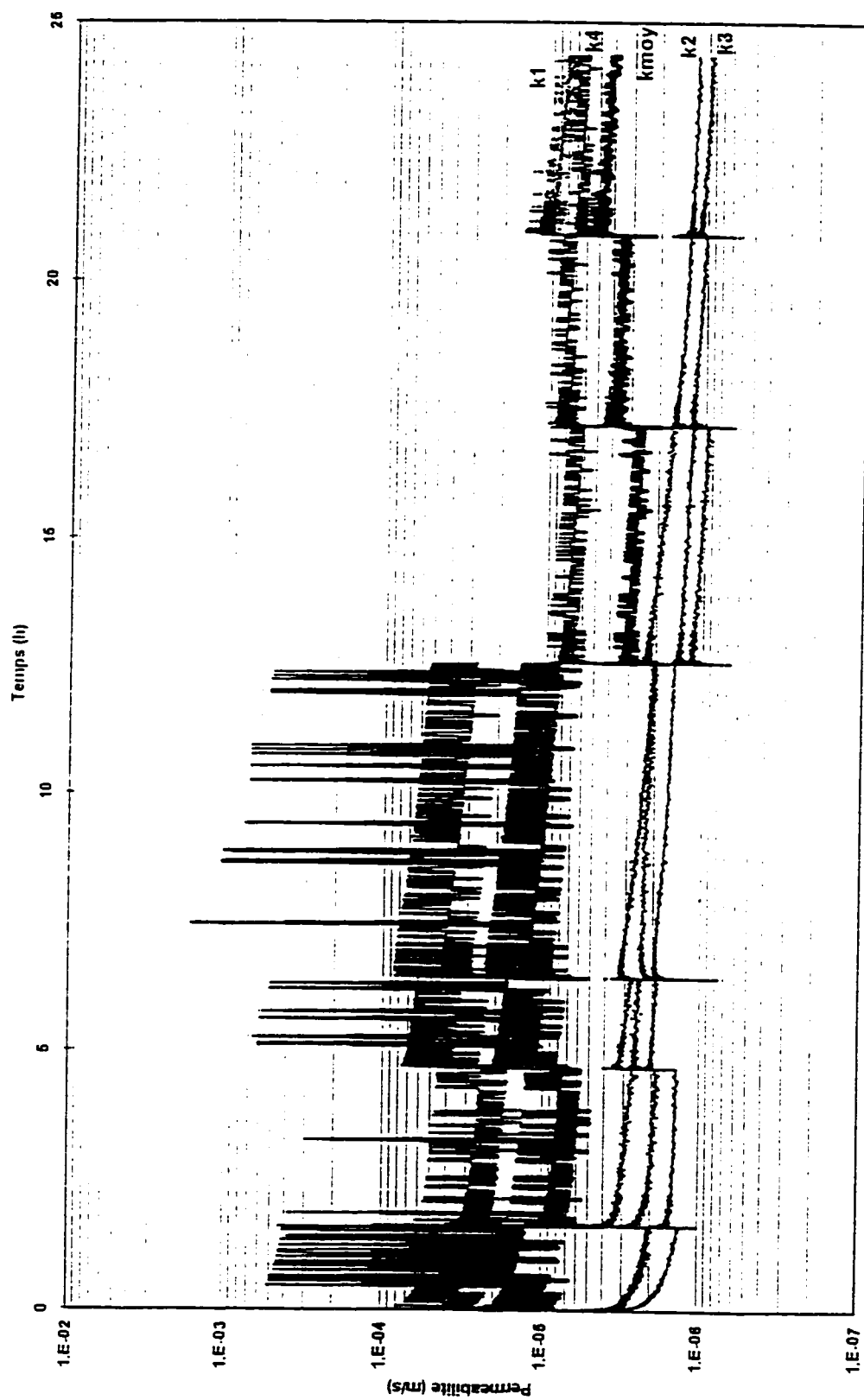


Figure B.15. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai APS12-F3

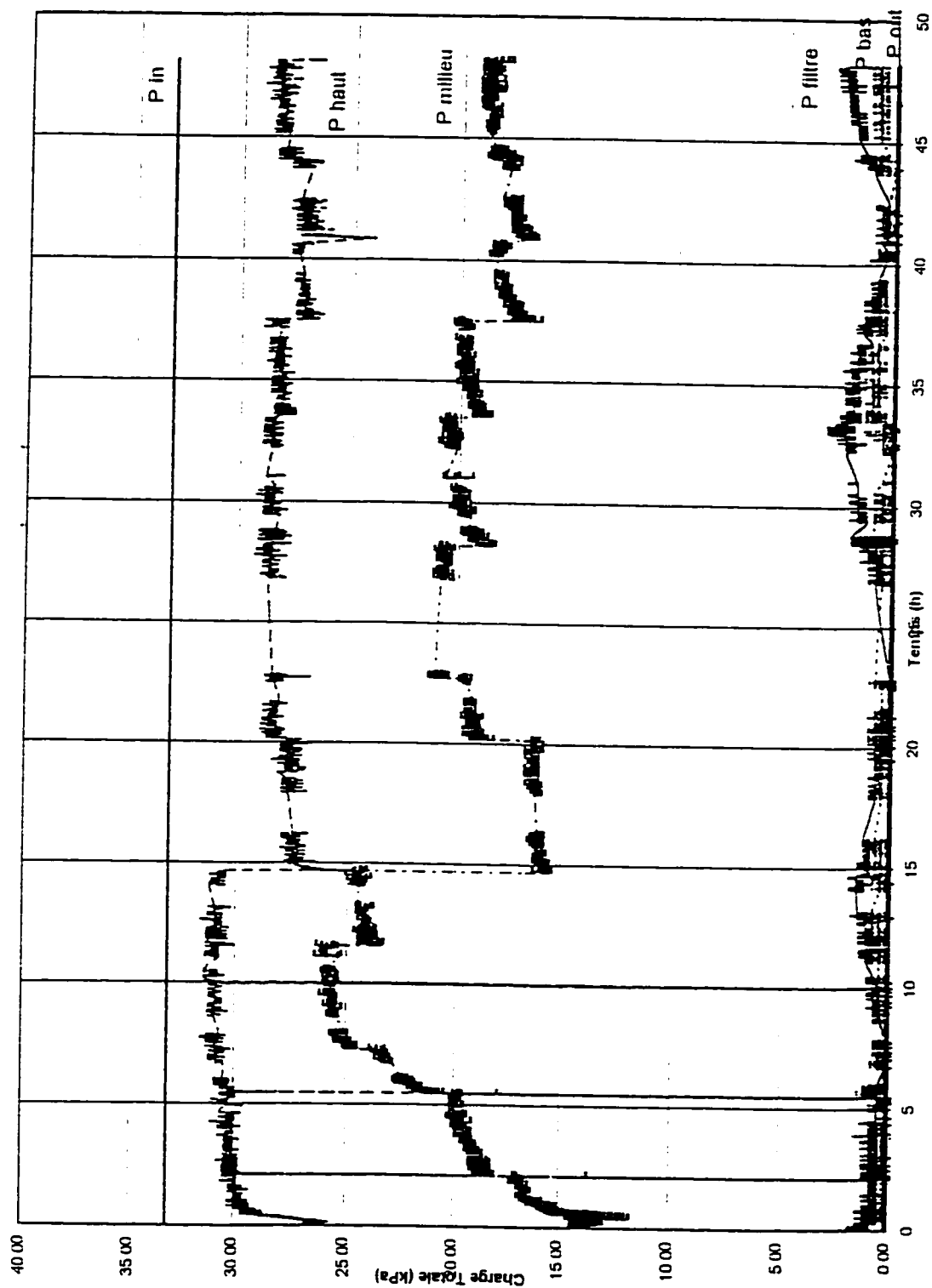


Figure B.16. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (1)

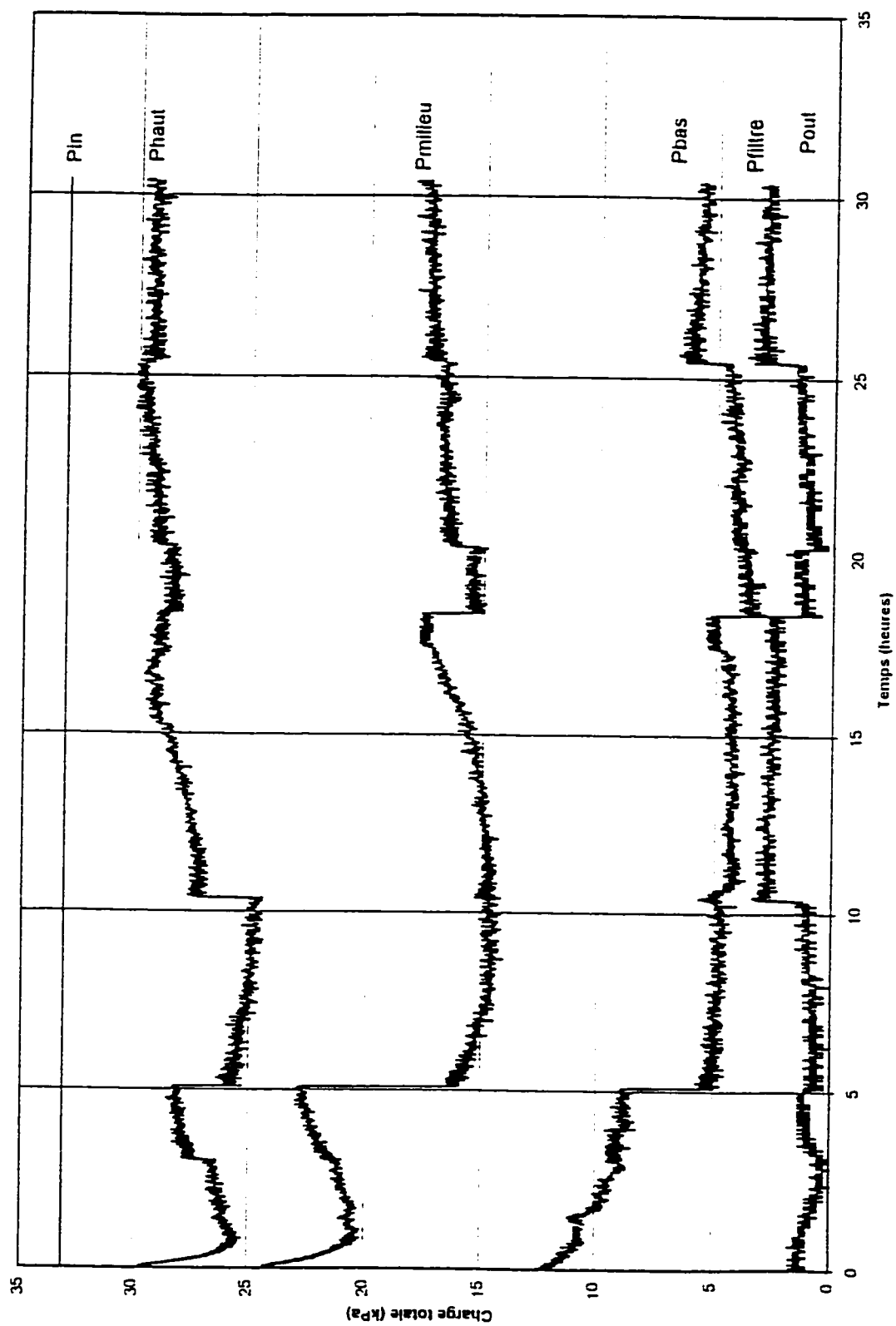


Figure B.17. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F1 (2)

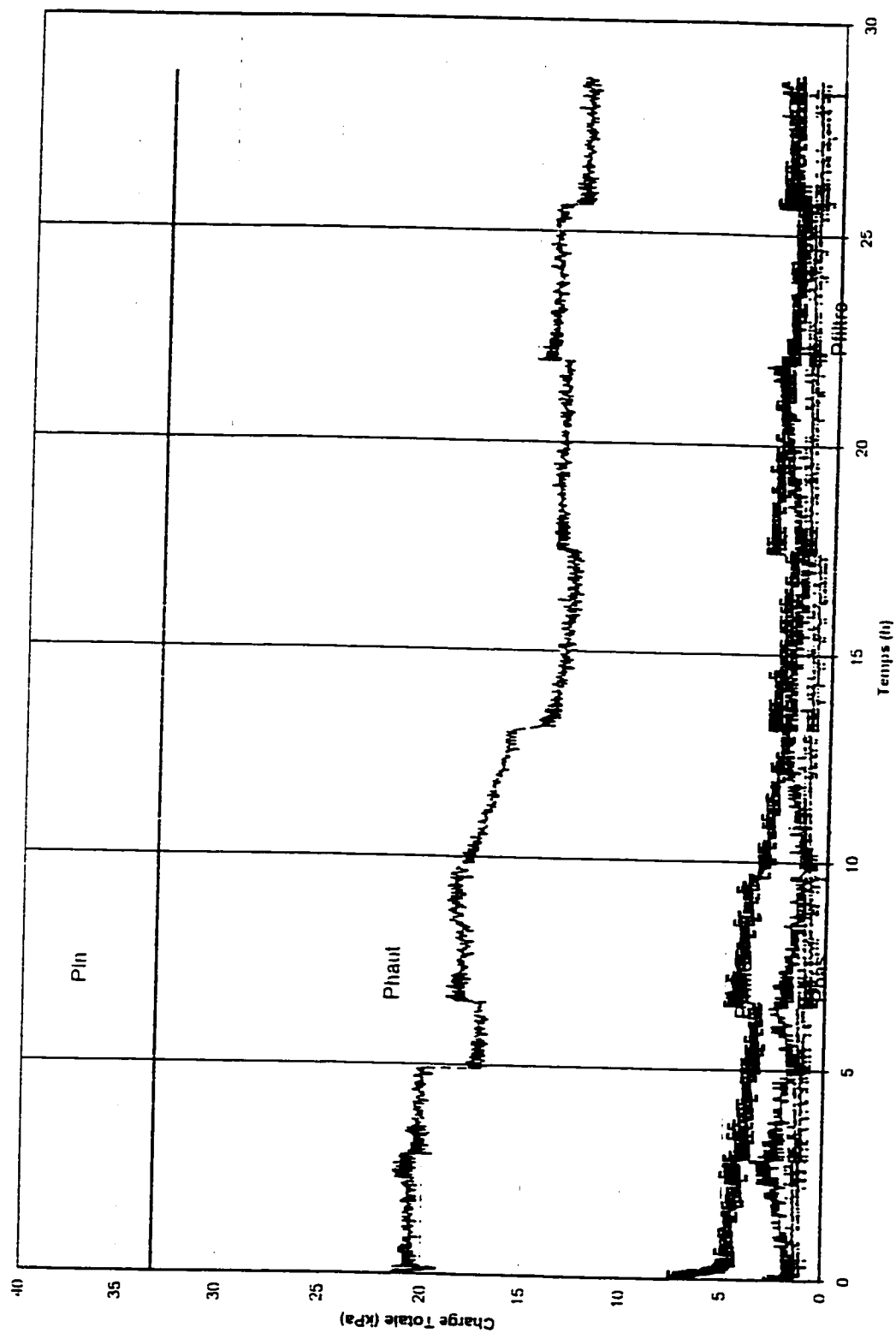


Figure B.18. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S12-F3

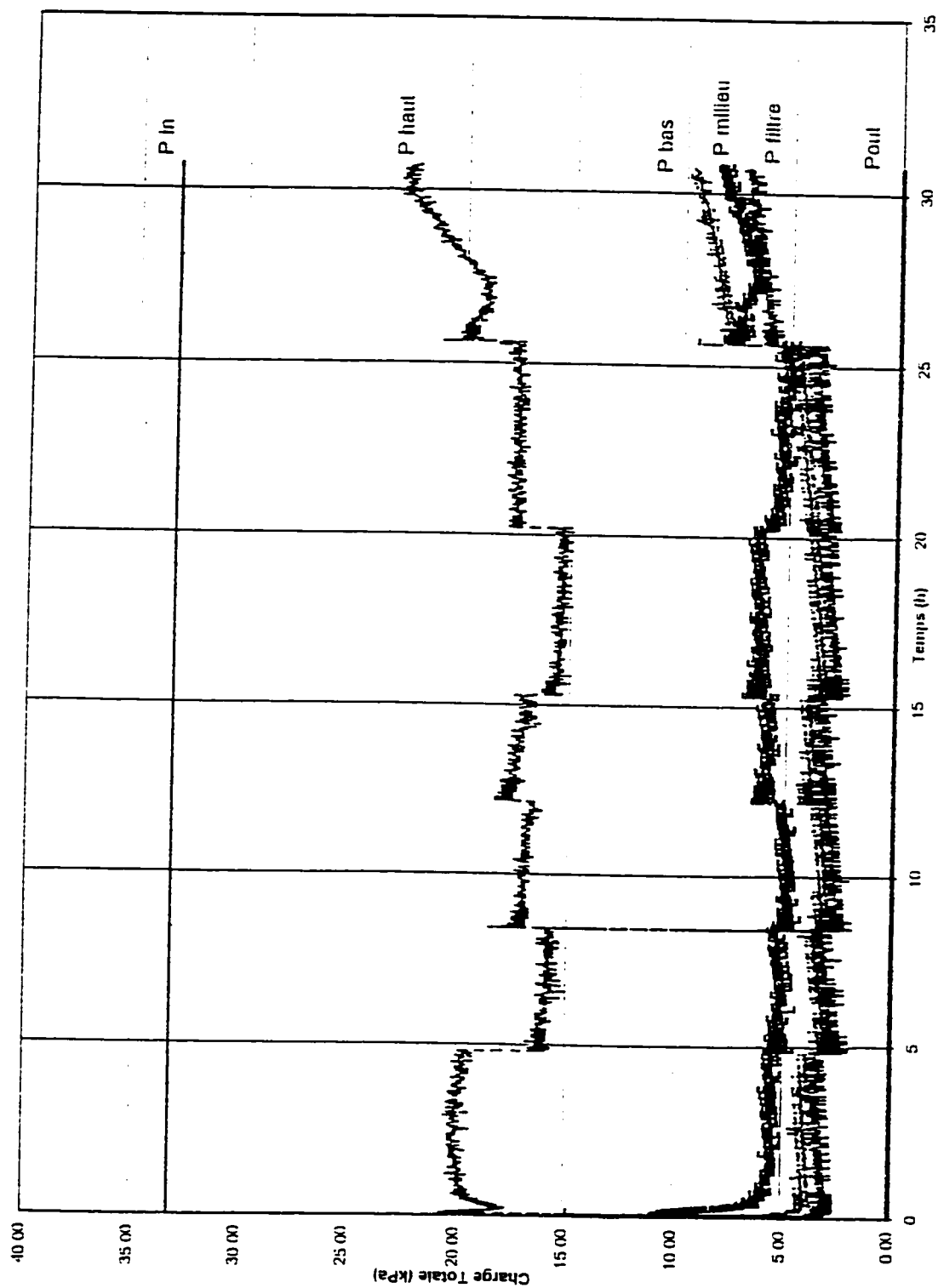


Figure B.19. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS12-F3

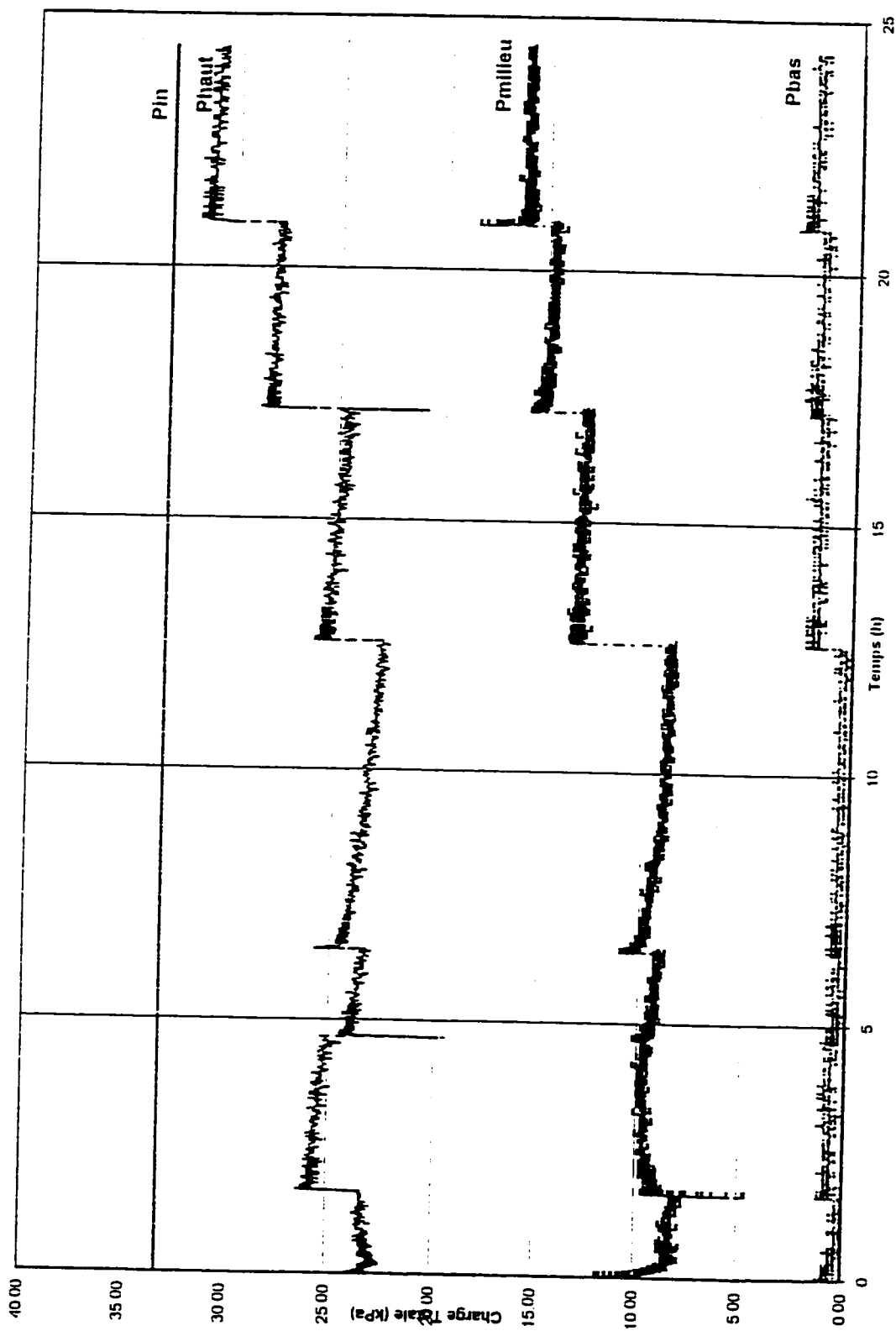


Figure B.20. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai APS12-F3

ANNEXE C

**Résultats des essais faits
sur le sol à 6 % de fines**

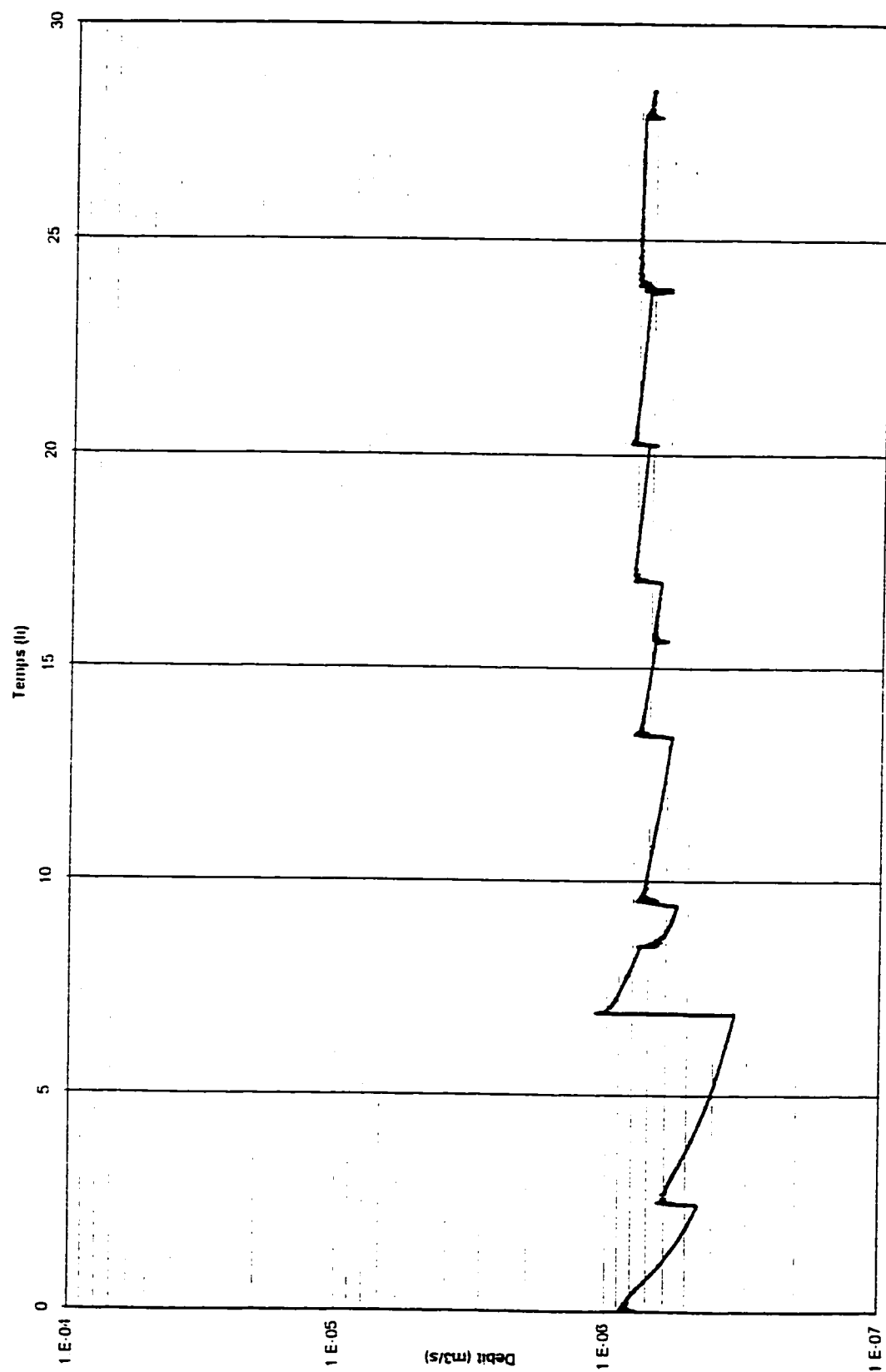


Figure C.1. Débit en fonction du temps pour l'essai PS6-F1

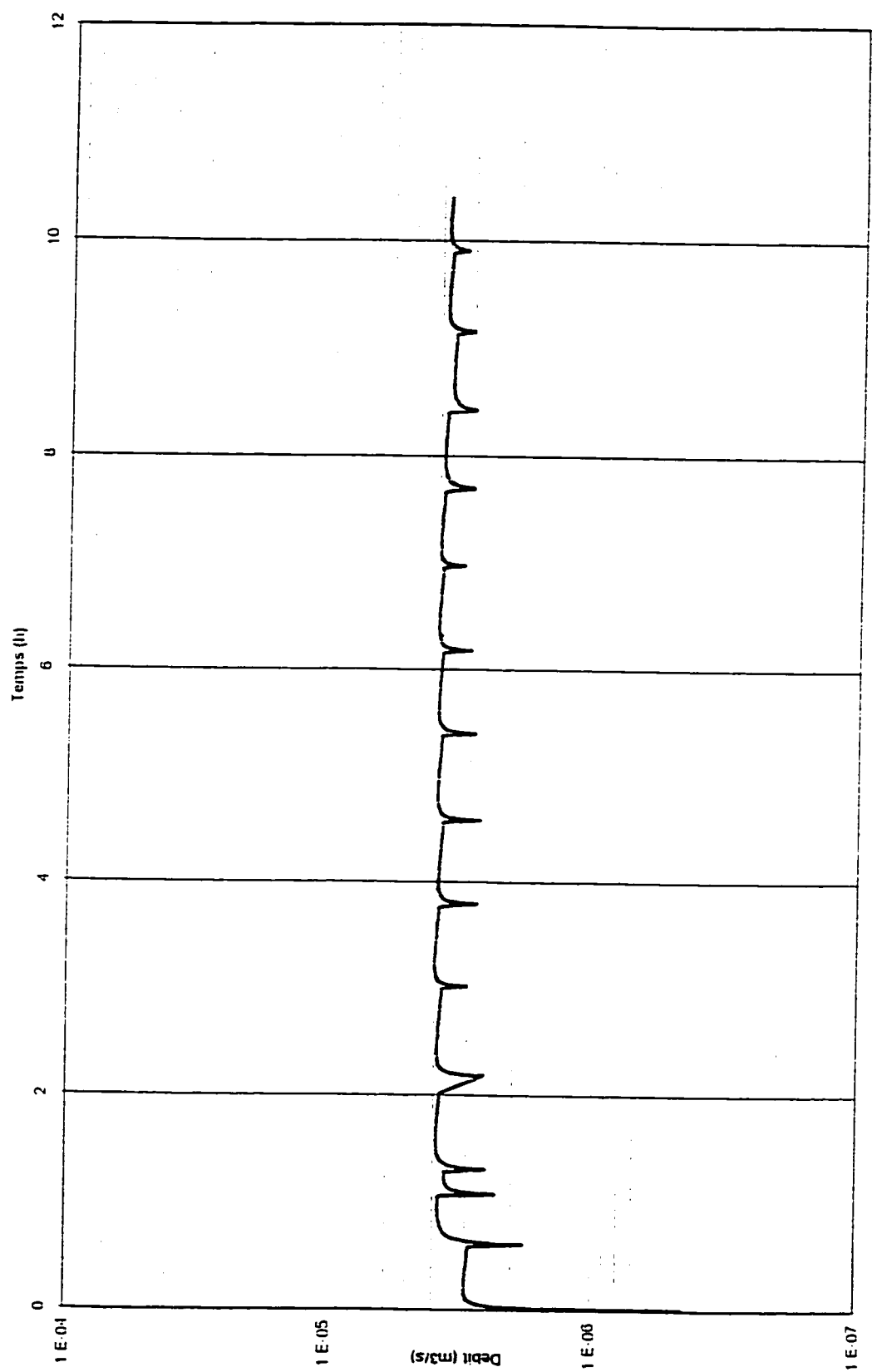


Figure C.2. Débit en fonction du temps pour l'essai PS6-P3

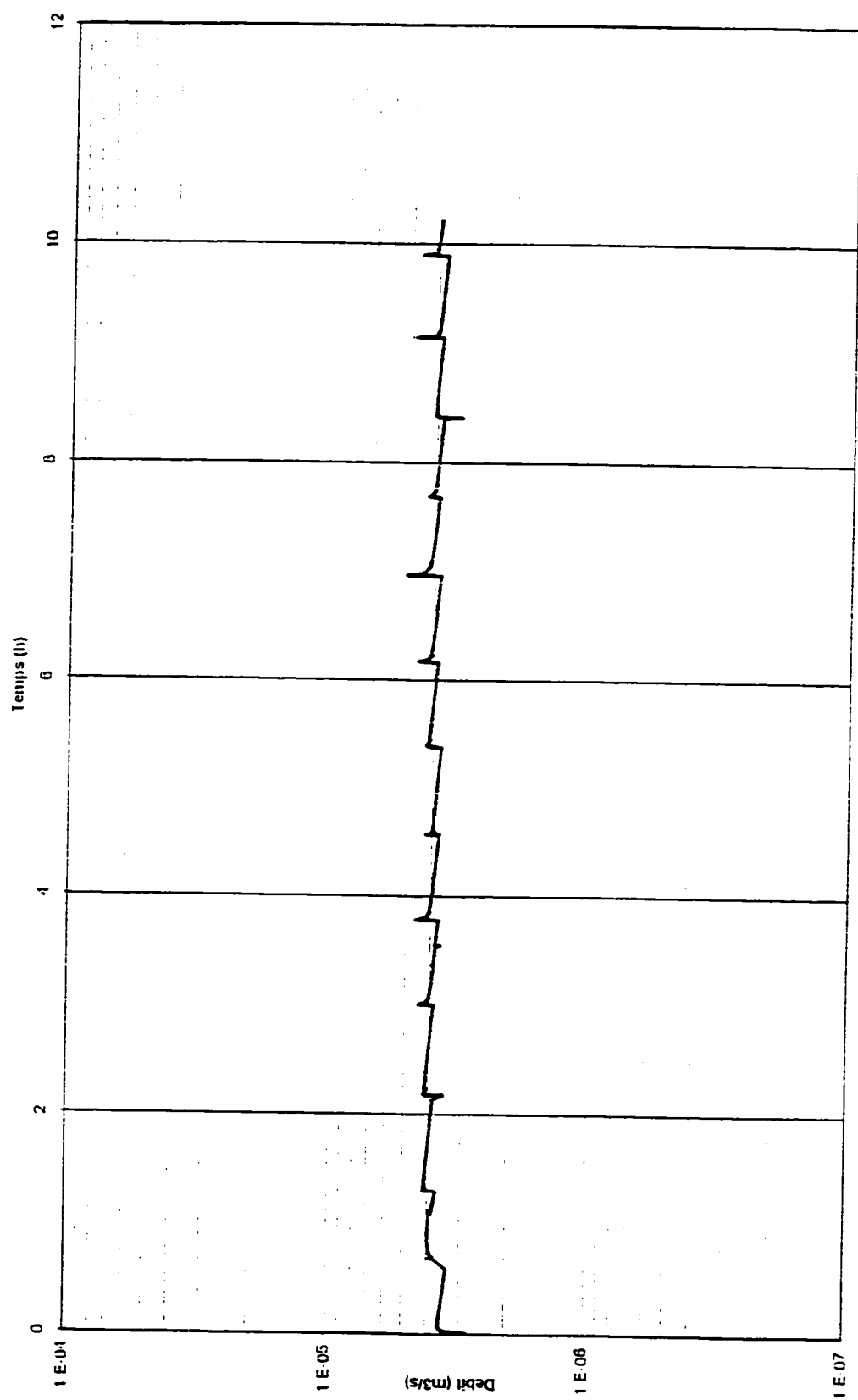


Figure C.3. Débit en fonction du temps pour l'essai S6-F3

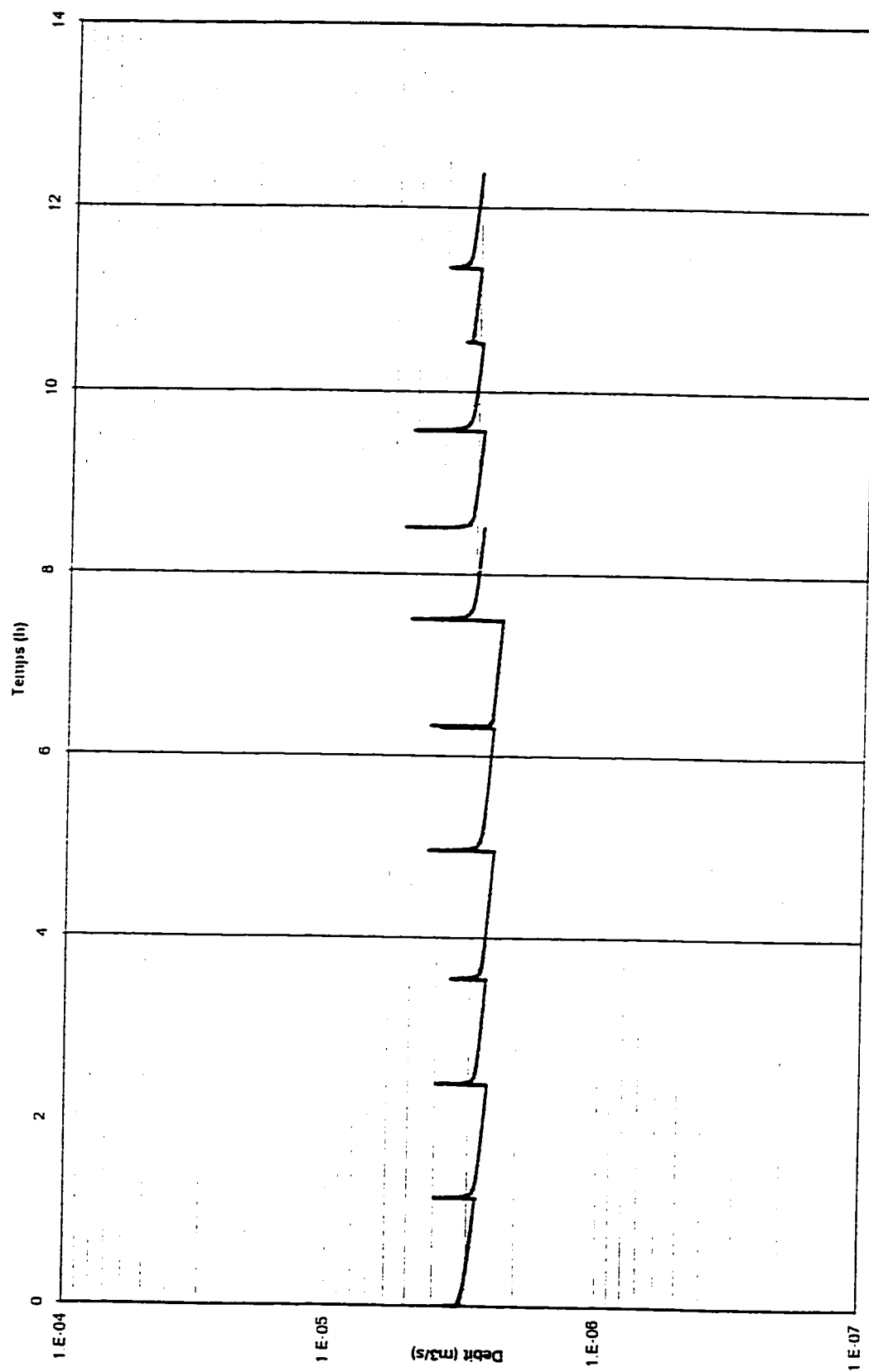


Figure C.4. Débit en fonction du temps pour l'essai AS6-F3

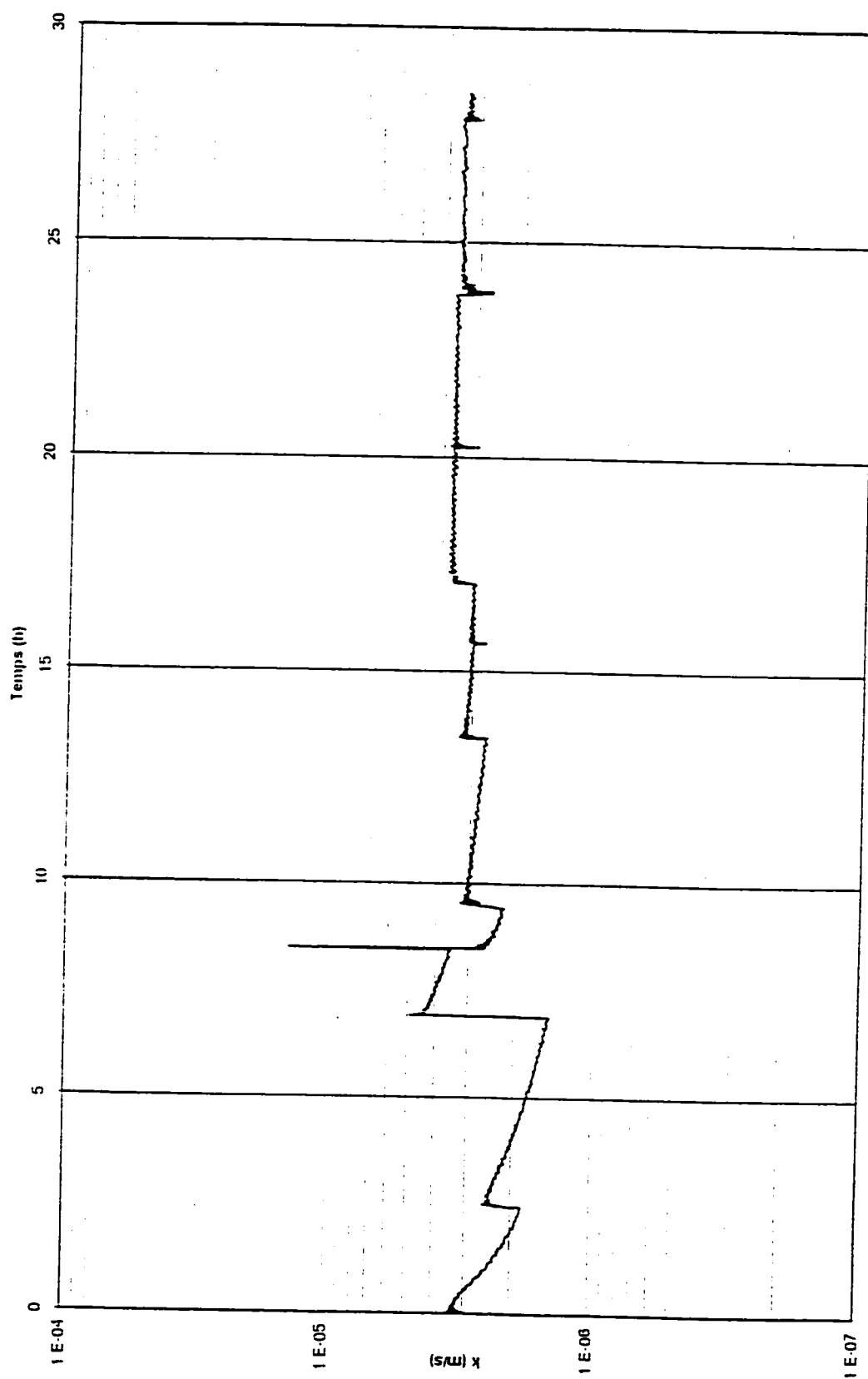


Figure C.5. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS6-F1

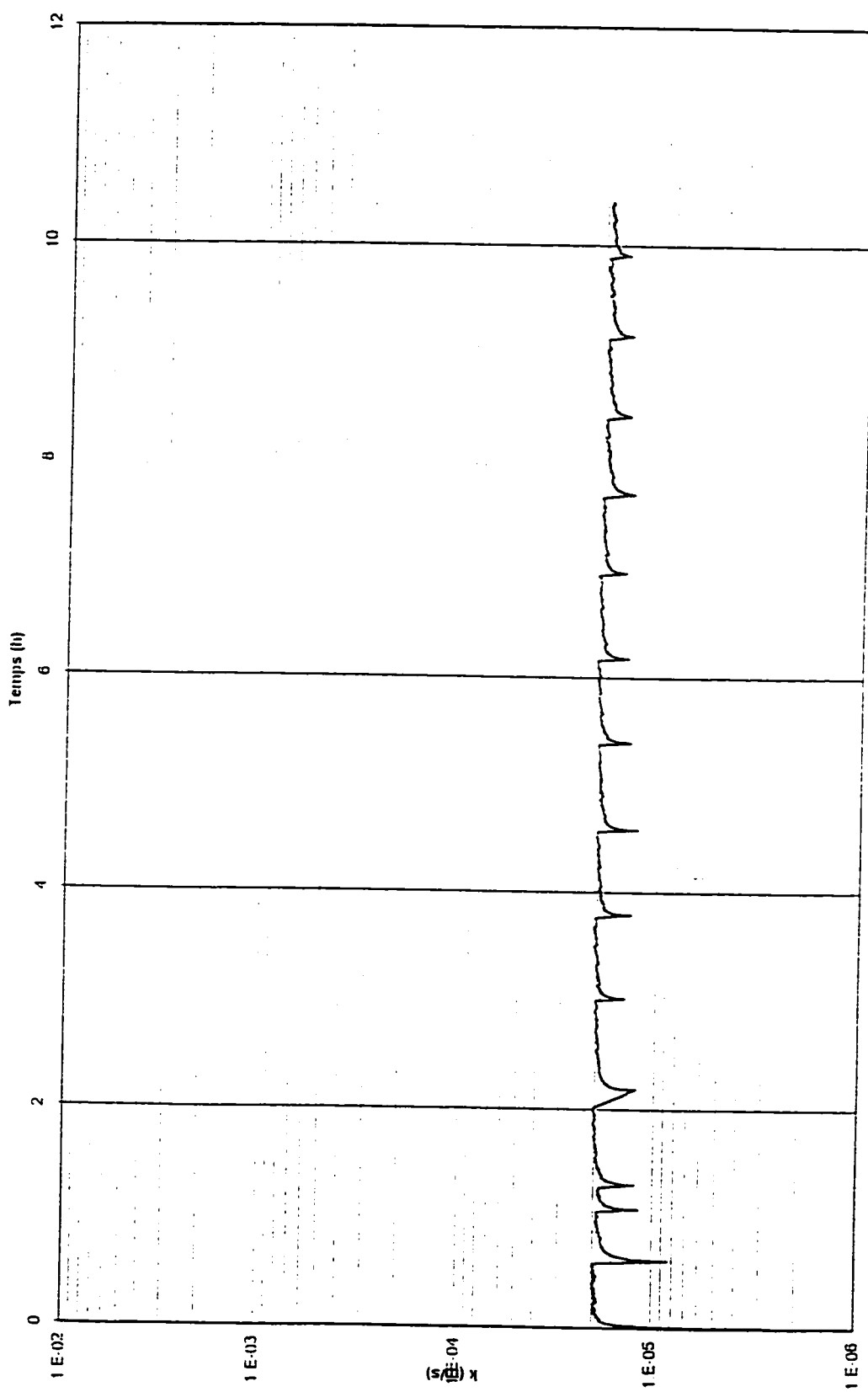


Figure C.6. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai PS6-F3

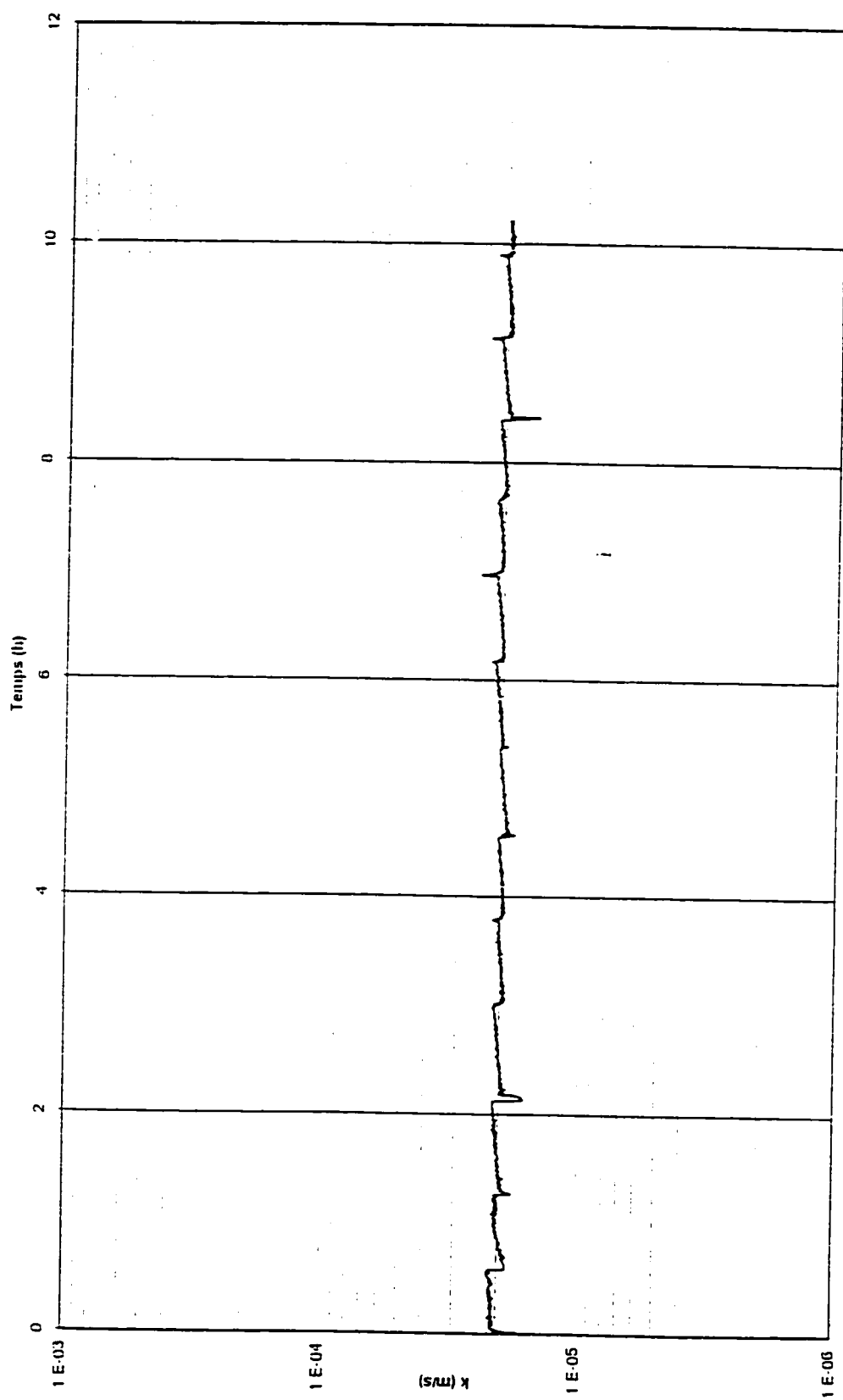


Figure C.7. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai S6-F3

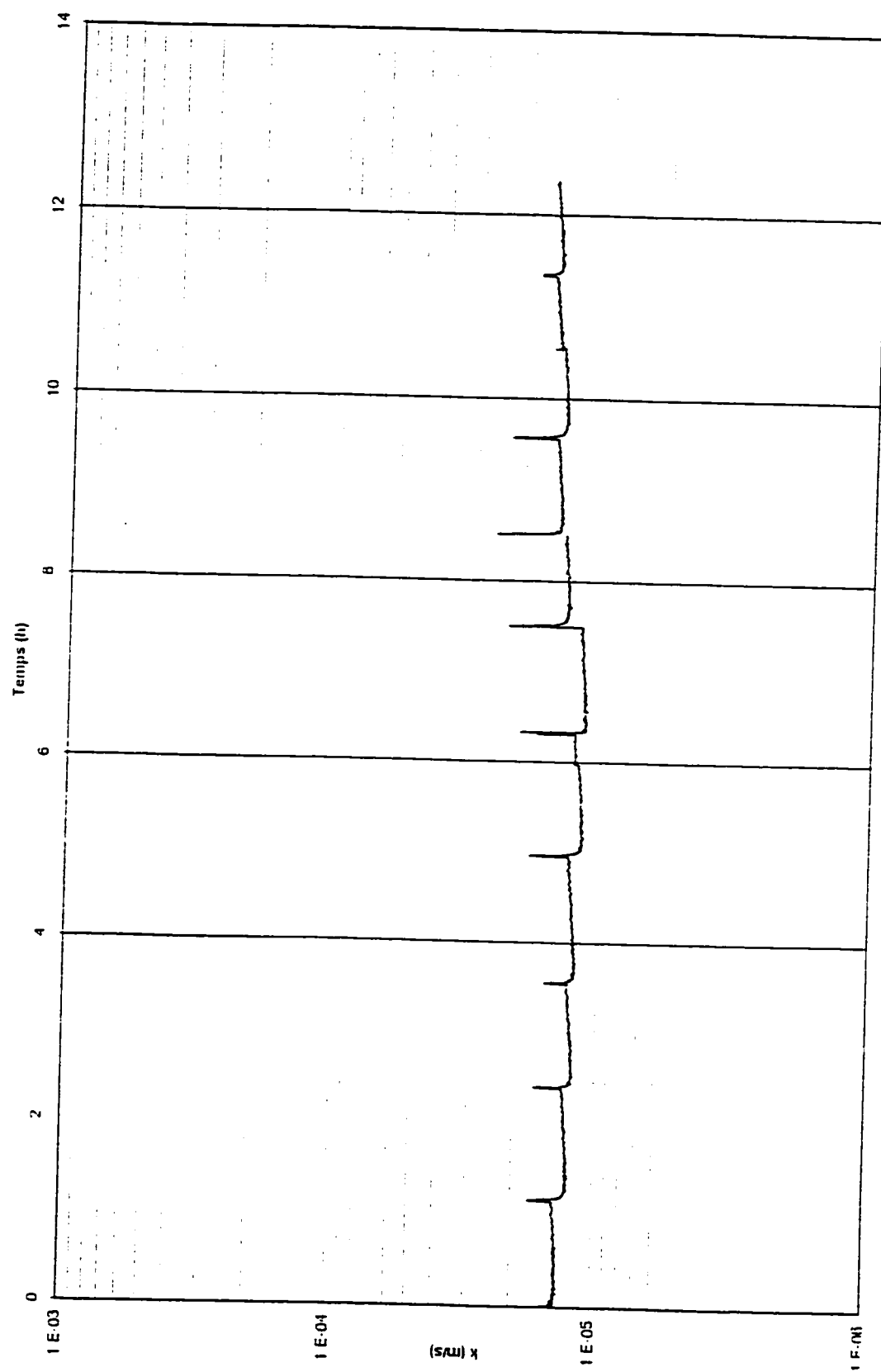


Figure C.8. Perméabilité globale en fonction du temps pour l'essai AS6-F3

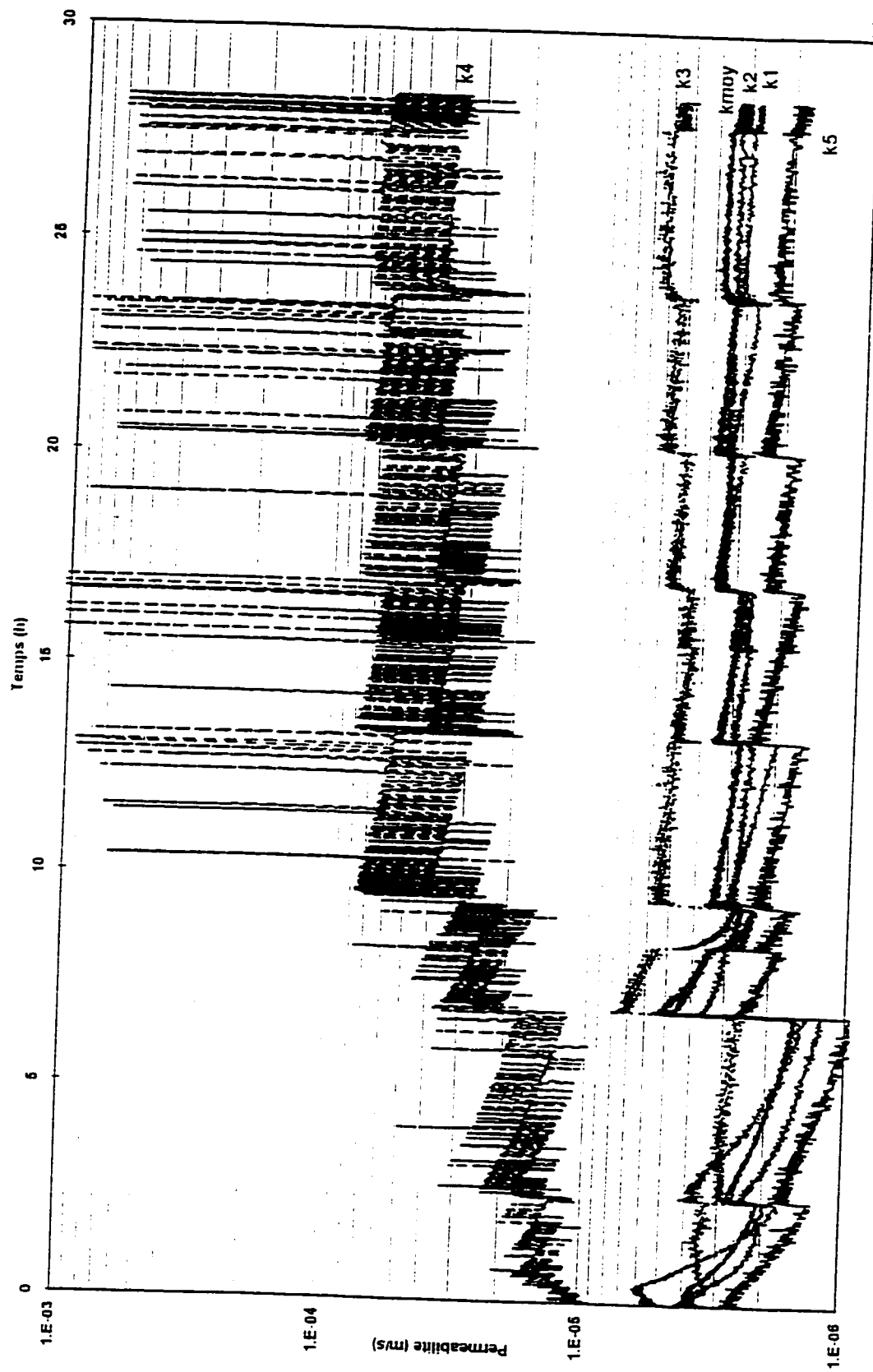


Figure C.9. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS6-F1

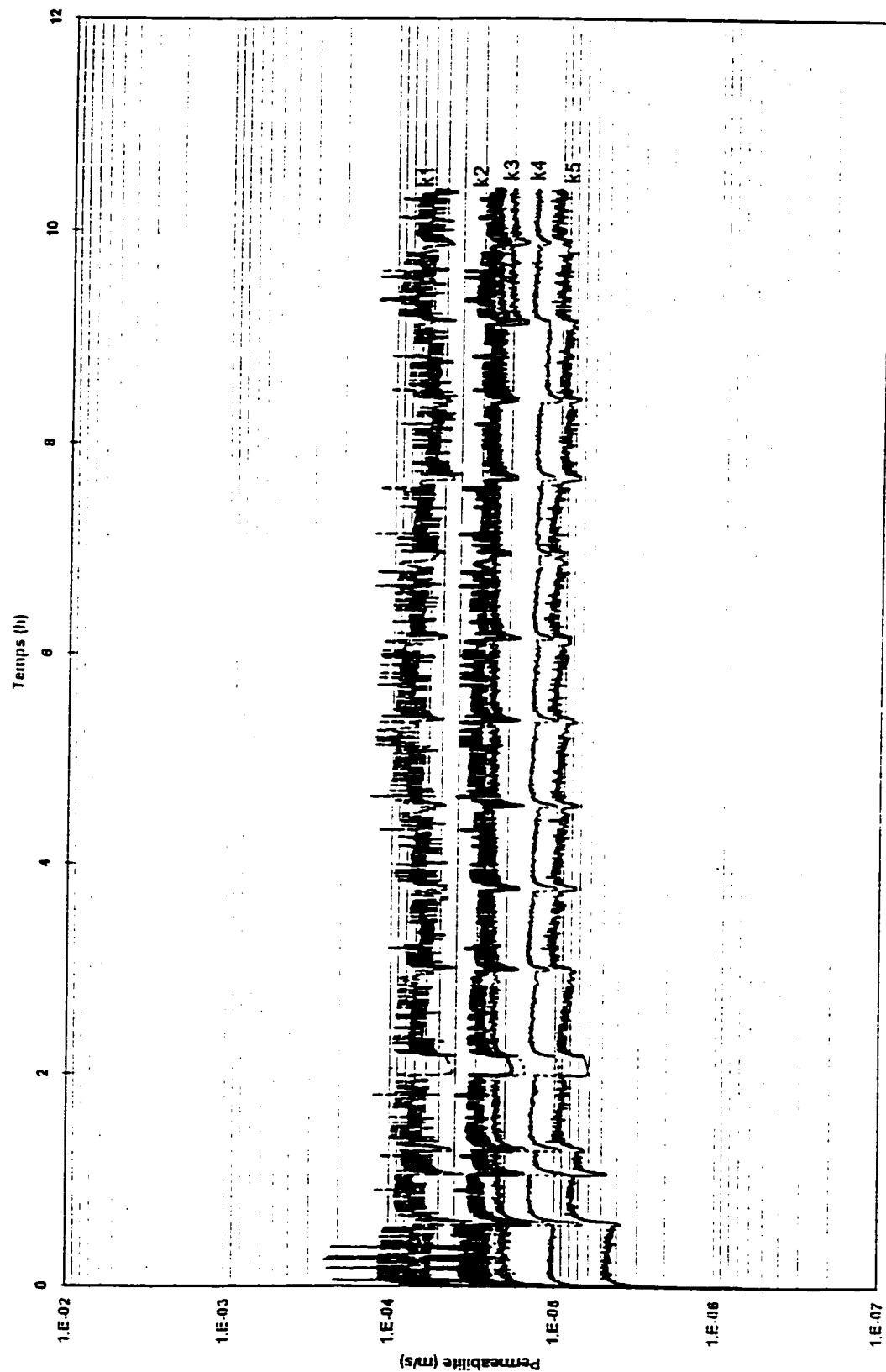


Figure C.10. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai PS6-F3

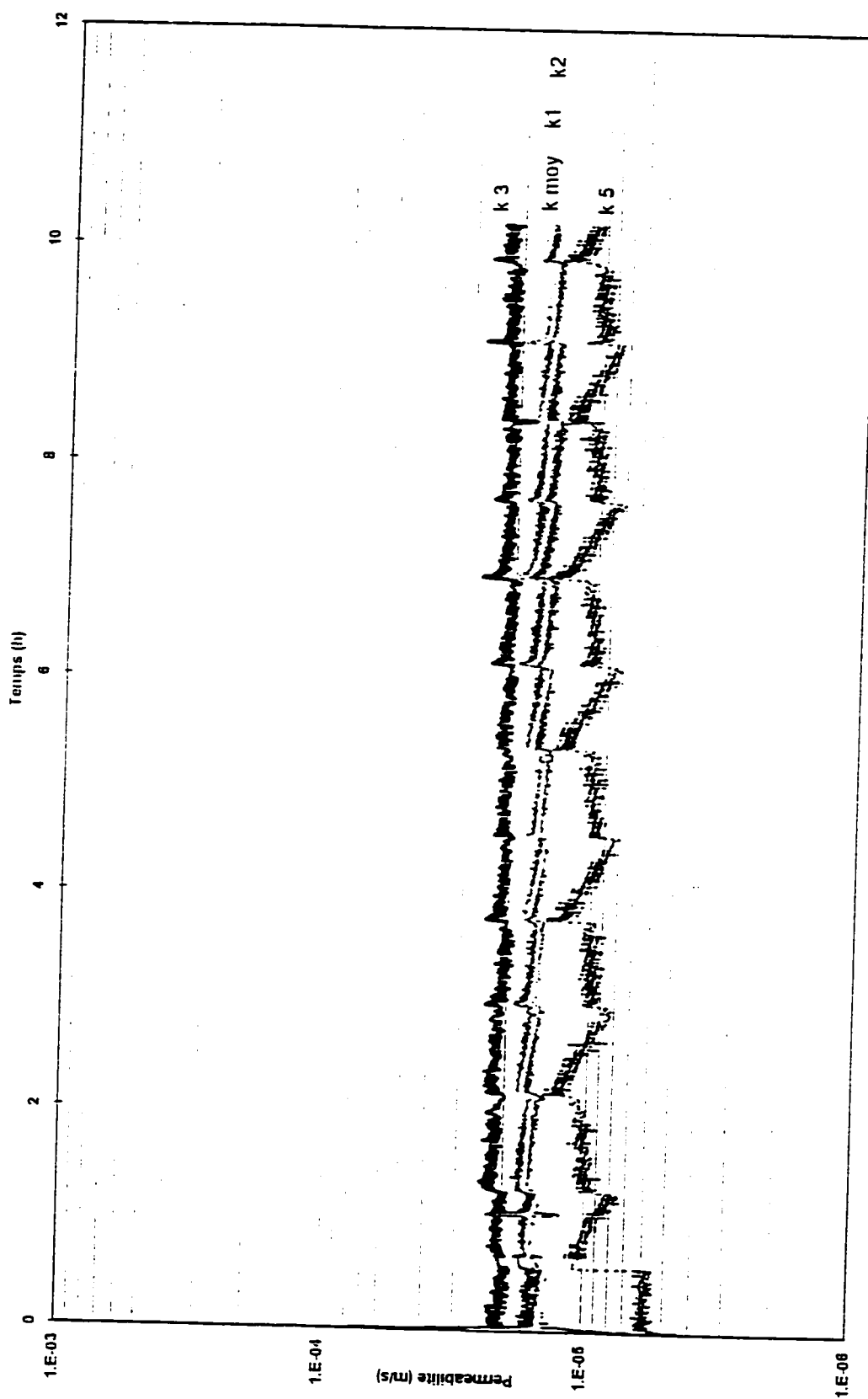


Figure C.11. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai S6-F3

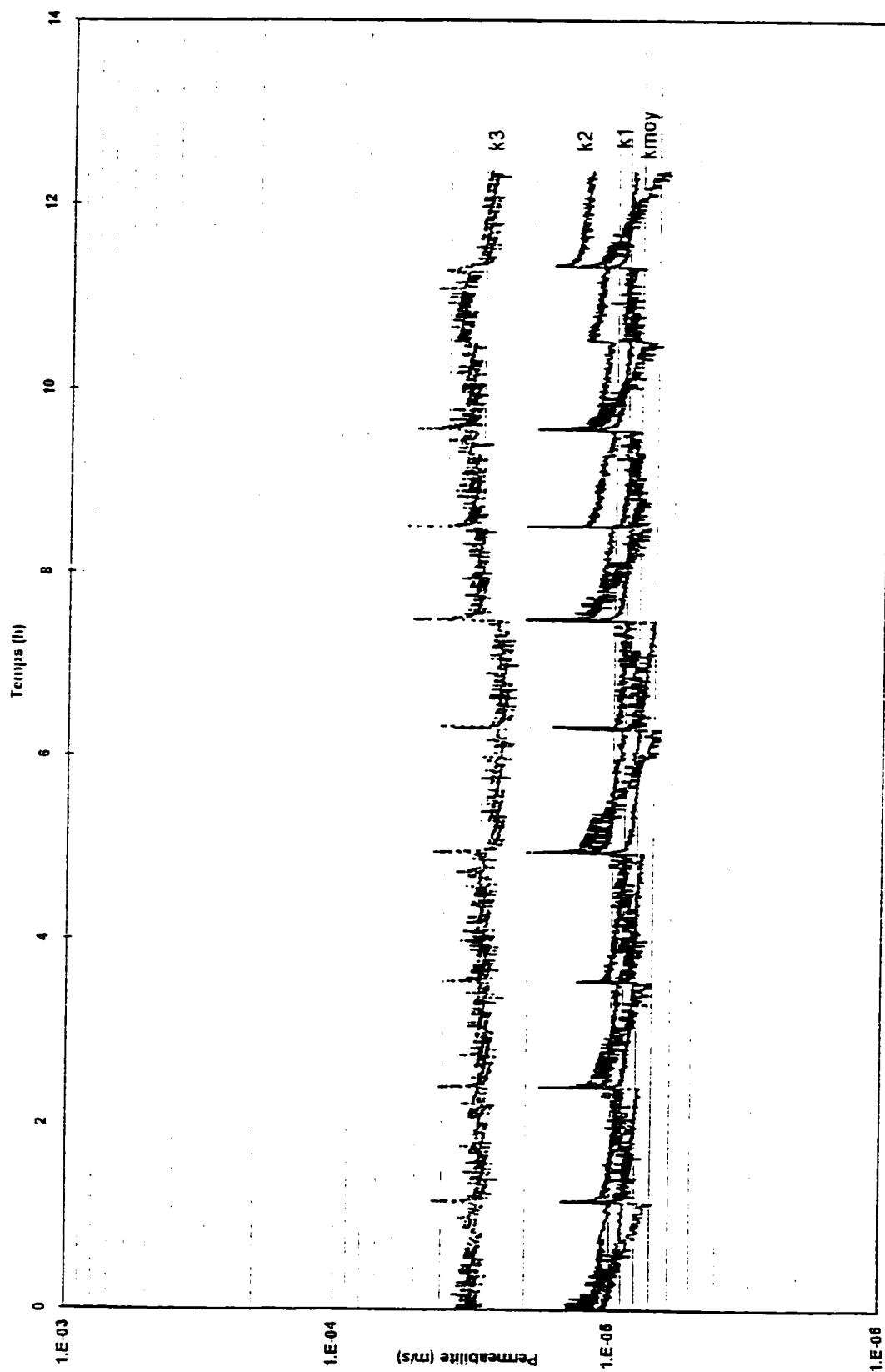


Figure C.12. Perméabilités locales en fonction du temps pour l'essai AS6-F3

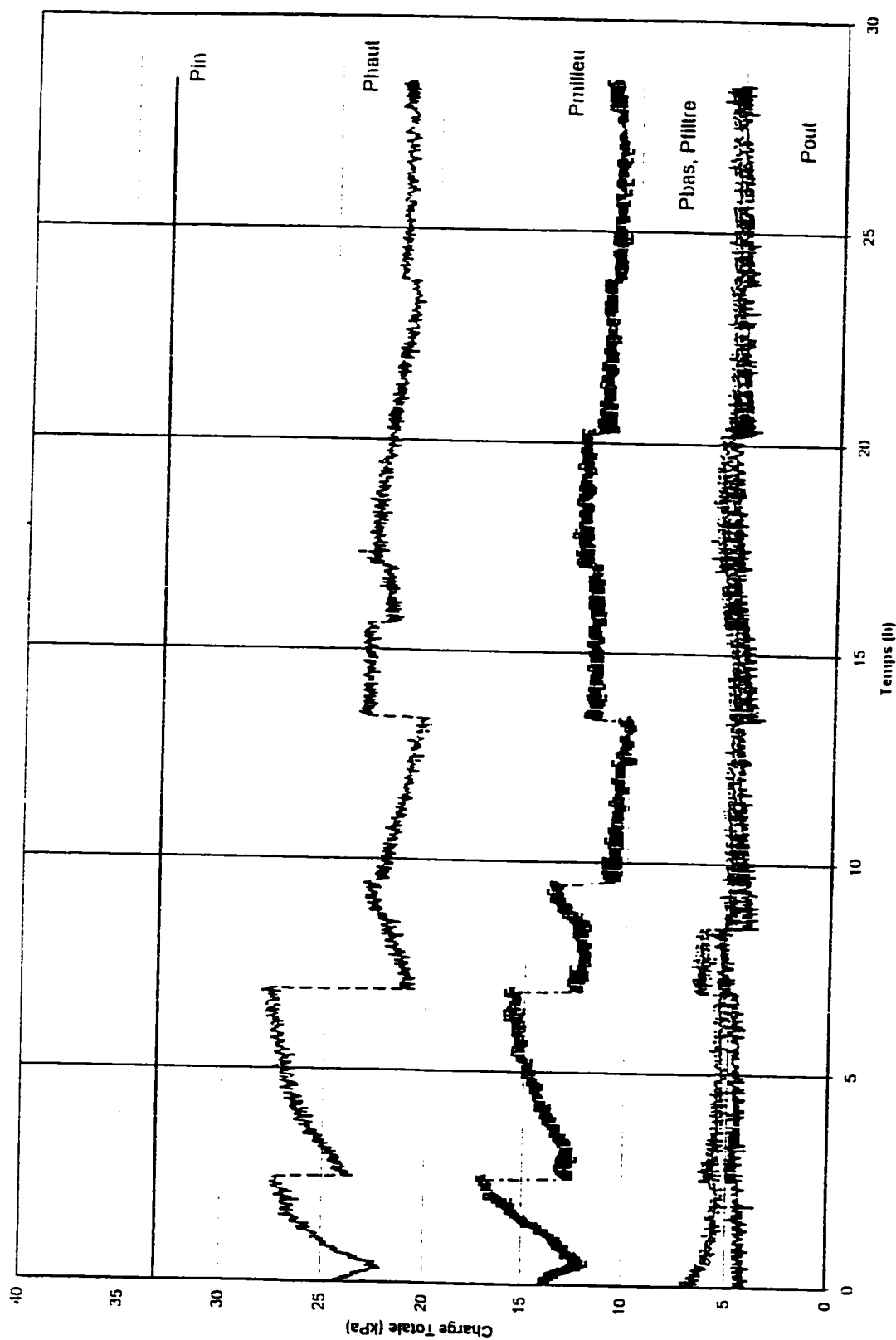


Figure C.13. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS6-F1

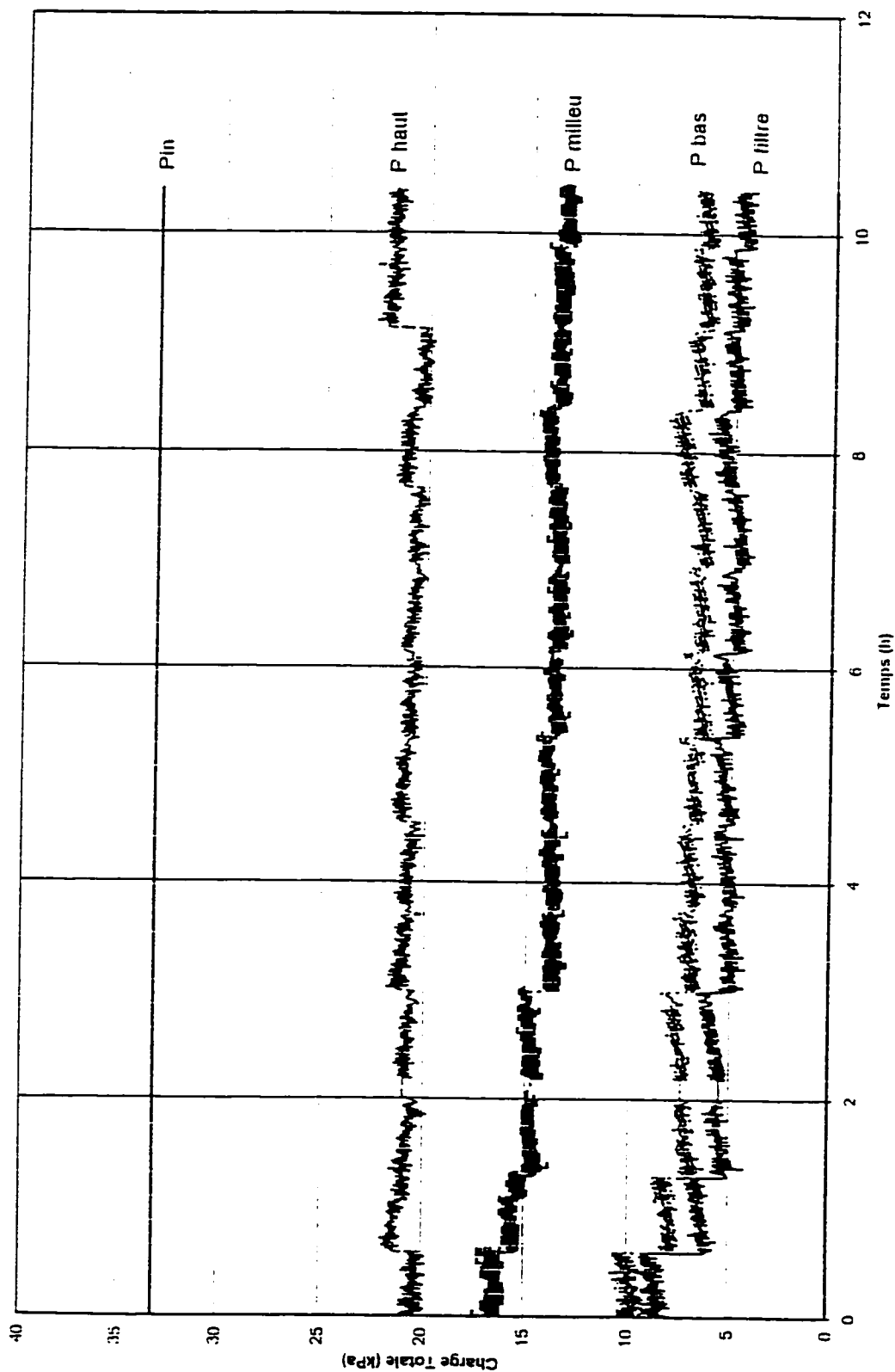


Figure C.14. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai PS6-F3

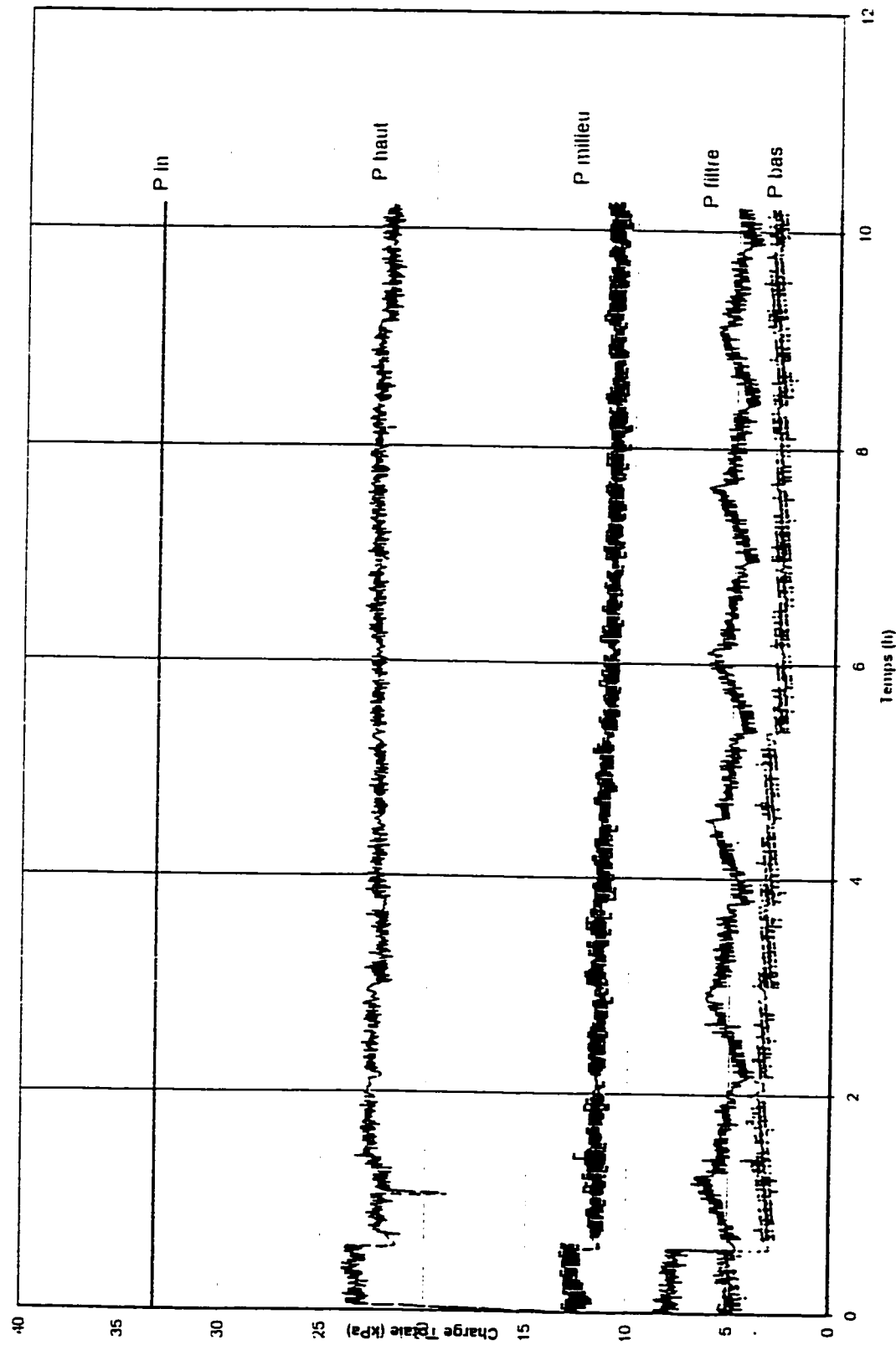


Figure C.15. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai S6-F3

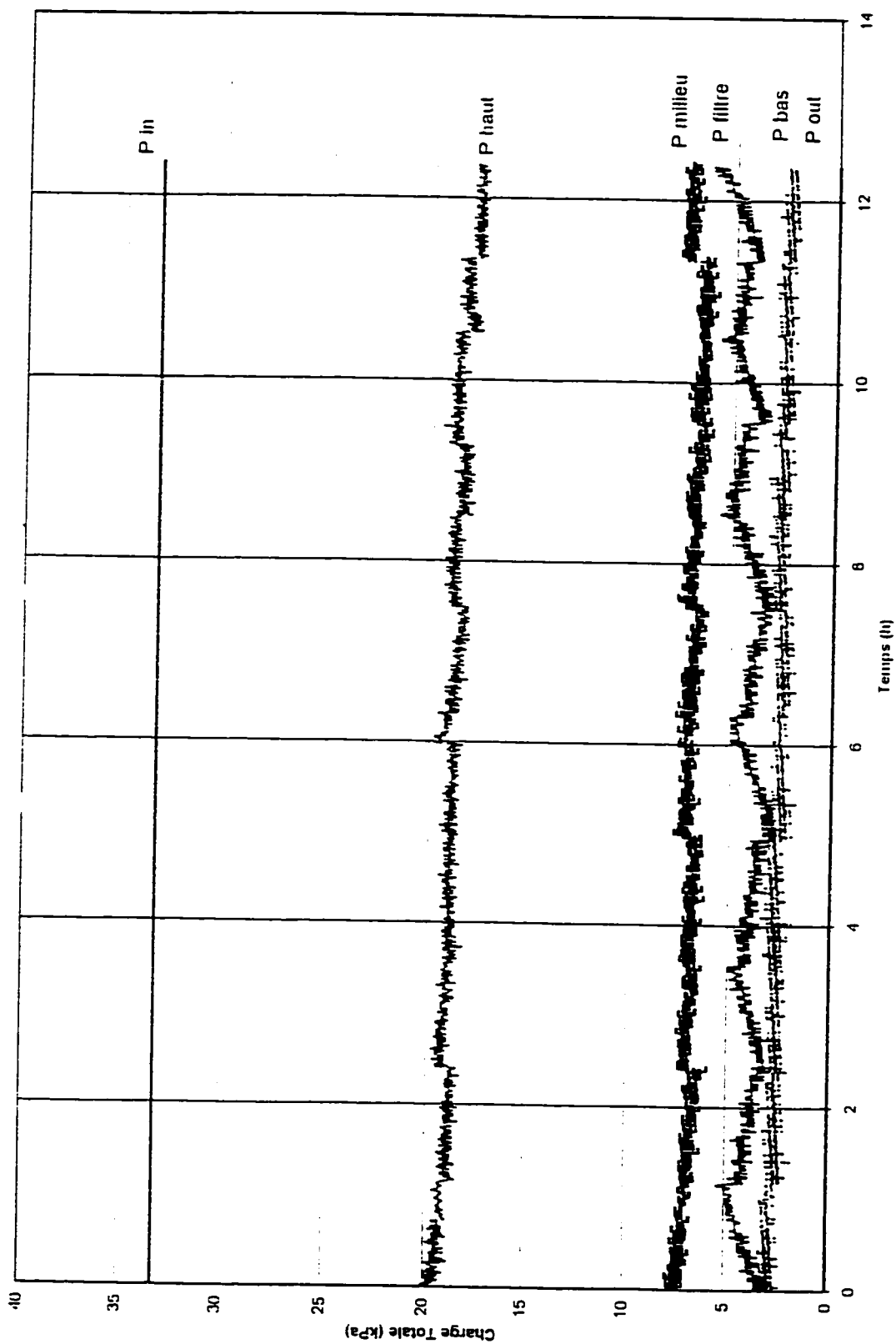


Figure C.16. Evolution des charges totales en fonction du temps pour l'essai AS6-F3

ANNEXE D
PRODUCTION DE FINES LORS DU COMPACTAGE
ET LAVAGE DES MORAINES

D.1 Production de fines lors du compactage au marteau Proctor standard

Loungnarath et Lafleur (1996) ont observé sur des mélanges granulaires reconstitués à partir de la moraine du dépôt 6 de LG4, que le pourcentage de fines mesuré après compactage était supérieur au pourcentage de fines initial. Cet écart était d'autant plus important que le pourcentage initial de fines était petit. Il en a été conclu que le compactage associé à la fragilité du gneiss granitique qui compose le till, serait à l'origine d'une production de fines.

Lors d'une nouvelle série d'essais on n'a pas constaté de production de fines lors du compactage. Le matériau utilisé était aussi de la moraine du dépôt 6 de LG4.

Une interrogation fut alors soulevée: y a-t-il oui ou non production de fines lors du compactage par impact?

D.1.1 Mode opératoire

On a étudié les mélanges suivants:

- 6 % de fines (Dulau)
- 12 % de fines (Dulau)
- moraine à l'état naturel (Bouthot)

Pour chacun des mélanges deux groupes ont été séparés :

- un groupe témoin
- un groupe expérimental.

Le groupe expérimental a été soumis au compactage. L'objectif était d'atteindre l'optimum proctor.

Trois échantillons ont été prélevés dans chaque groupe.

Une analyse granulométrique a été réalisée.

Les résultats sont présentés ci-après.

D.1.2 Résultats

Tableau D.1 Résultats

% fines visé	% fines groupe témoin	moyenne	% fines après compactage	moyenne
6	5.9	6.2	6.1	6.2
	6.4		6.2	
	6.2		6.4	
12	11.8	12.2	12.3	12.3
	12.3		12.1	
	12.5		12.6	
moraine	27.8	28.3	27.9	28.1
naturelle	28.8		28.3	
	28.4		28	

On constate qu'il n'y a pas de production de fines quelque soit la teneur en fine initiale.

Une étude plus complète a été réalisée et présentée par Martin Bouthot à Hydro-Québec à ce sujet.

D.2 Lavage des moraines

Lors de l'étude précédente les mélanges granulaires ont été reconstitués à partir de la moraine de LG4 tamisée à sec sur le tamis 80 μm . Le pourcentage de fines désiré était alors rajouté. L'essai de percolation fini, l'échantillon de sol était découpé en tranches. Chaque tranche était alors tamisée. Les tranches étaient lavées sur le tamis n°200 (74 μm), séchées et tamisées à sec sur le tamis 80 μm . On constatait que le pourcentage de fines final excédait le pourcentage initial.

Le mode opératoire de tamisage des fines était différent selon que l'on préparait le sol ou que l'on voulait déterminer le pourcentage final de fines. Mais le but restait le même : séparer les fines de la fraction plus grossière.

En répétant l'opération de tamisage à sec de la moraine naturelle, on s'est aperçus que des fines restaient collées à des particules grossières ou que certaines étaient agglutinées entre elles. Etant donné que le compactage ne produit pas de fines, nous avons émis l'hypothèse suivante :

- l'écart entre le pourcentage de fines final et le pourcentage initial est du à la procédure de tamisage. Le tamisage à sec des moraines ne permet pas de récupérer toutes les fines.

On a réalisé une série d'essais afin de comparer les deux méthodes de tamisage et leur efficacité à séparer les fines de la fraction plus grossière.

Les essais ont été réalisés sur la moraine naturelle du dépôt 6 de LG4

D.2.1 Mode opératoire

- Etape A : un échantillon de 3 kg a été lavé sur le tamis n°200 (74 μm), séché et tamisé à sec sur le tamis de 80 μm .
- Etape B : deux échantillons de 500 g ont été tamisés à sec 4 à 5 fois. A chaque opération de tamisage la masse de chaque fraction a été mesurée. Le passant 80 μm a été pesé et enlevé. Lorsque la masse de fines récupérée est devenue constante, on a lavé l'échantillon pour récupérer les fines restantes.

Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

D.2.2 Résultats

D.2.2.1 Etape A : lavage, tamisage à sec

Tableau D.2 Résultats du lavage

Masse avant lavage (g) A	3832
Masse après lavage (g) B	3070
Masse de fines lavée (g) $C = A - B$	756
% de fines récupéré au lavage $= C / A$	19.73

Tableau D.3 Résultats du tamisage à sec

Tamis (mm)	Masse retenue (g)
40	0
28	0
20	53
14	143
10	52
5	101
2.5	125
1.25	190
0.630	392
0.315	569
0.160	617
0.080	568
< 0.080	283
% de fines récupéré	$283 / 3832 = 7.4 \%$

On récupère encore 7.4 % de fines après un lavage sur le tamis n°200 (74µm).

D'après les analyses sédimentométriques réalisées lors de l'étude précédente, on sait que 1 % des fines récupérées proviennent de la différence de taille des tamis. Cette étape réalisée en deux opérations : lavage + tamisage à sec, nous permet de récupérer 19.7+7.4

= 27.1 % de fines. Le pourcentage de fines de la moraine naturelle est d'environ 26.8 %. Ce procédé de tamisage est fiable.

D.2.2.2 Etape B : série de tamisages à sec, lavage

Les valeurs contenues dans les tableaux D.4 et D.5 sont les masses retenues sur les tamis, exprimées en grammes.

Tableau D.4 Résultats de la série de tamisage réalisée sur l'échantillon 1

Tamis (mm)	Tamisage 1	Tamisage 2	Tamisage 3	Tamisage 4	Tamisage 5
40	0	0	0	0	0
28	61	61	61	61	61
20	0	0	0	0	0
14	14	14	14	14	14
10	15	15	15	15	15
5	16	16	16	16	16
2.5	19	19	18	18	18
1.25	31	30	30	29	29
0.630	69	64	63	63	62
0.315	157	142	136	131	124
0.160	134	131	131	131	131
0.080	99	94	92	92	91
0.080<	53	20	10	6	7
<i>% de fines récupéré</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>1.5</i>	<i>0.9</i>	<i>1</i>

Tableau D.5 Résultats de la série de tamisage réalisée sur l'échantillon 2

Tamis (mm)	Tamisage 1	Tamisage 2	Tamisage 3	Tamisage 4
40	0	0	0	0
28	92	92	92	92
20	0	0	0	0
14	6	6	6	6
10	15	15	15	15
5	19	13	13	12
2.5	14	14	14	14
1.25	22	22	22	22
0.630	50	49	49	48
0.315	99	93	89	86
0.160	96	96	90	90
0.080	85	77	72	67
0.080<	51	14	12	6
<i>% de fines récupéré</i>	<i>9</i>	<i>2.5</i>	<i>2</i>	<i>1</i>

Tableau D.6 Résultats du lavage sur les deux échantillons

	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse avant lavage (g)	568	468
Masse après lavage (g)	508	426
Masse fines lavées (g)	60	42
% de fines récupéré	9	7.7

% total fines récupérées série tamisage+lavage	23.4	22.2
---	------	------

On constate qu'au bout de 5 tamisages, pour l'échantillon 1, et 4, pour l'échantillon 2, on n'a récupéré que 14.4 et 14.5 % de fines sur les 26.8% contenus dans la moraine naturelle. Dans les deux cas on s'aperçoit qu'après trois tamisages successifs, pour chaque tamisage supplémentaire nous ne récupérerons qu'un pourcent de fines. Il faudra donc autant d'opération de tamisage que de pourcent nous séparant de la teneur réelle de fines (figure D1)

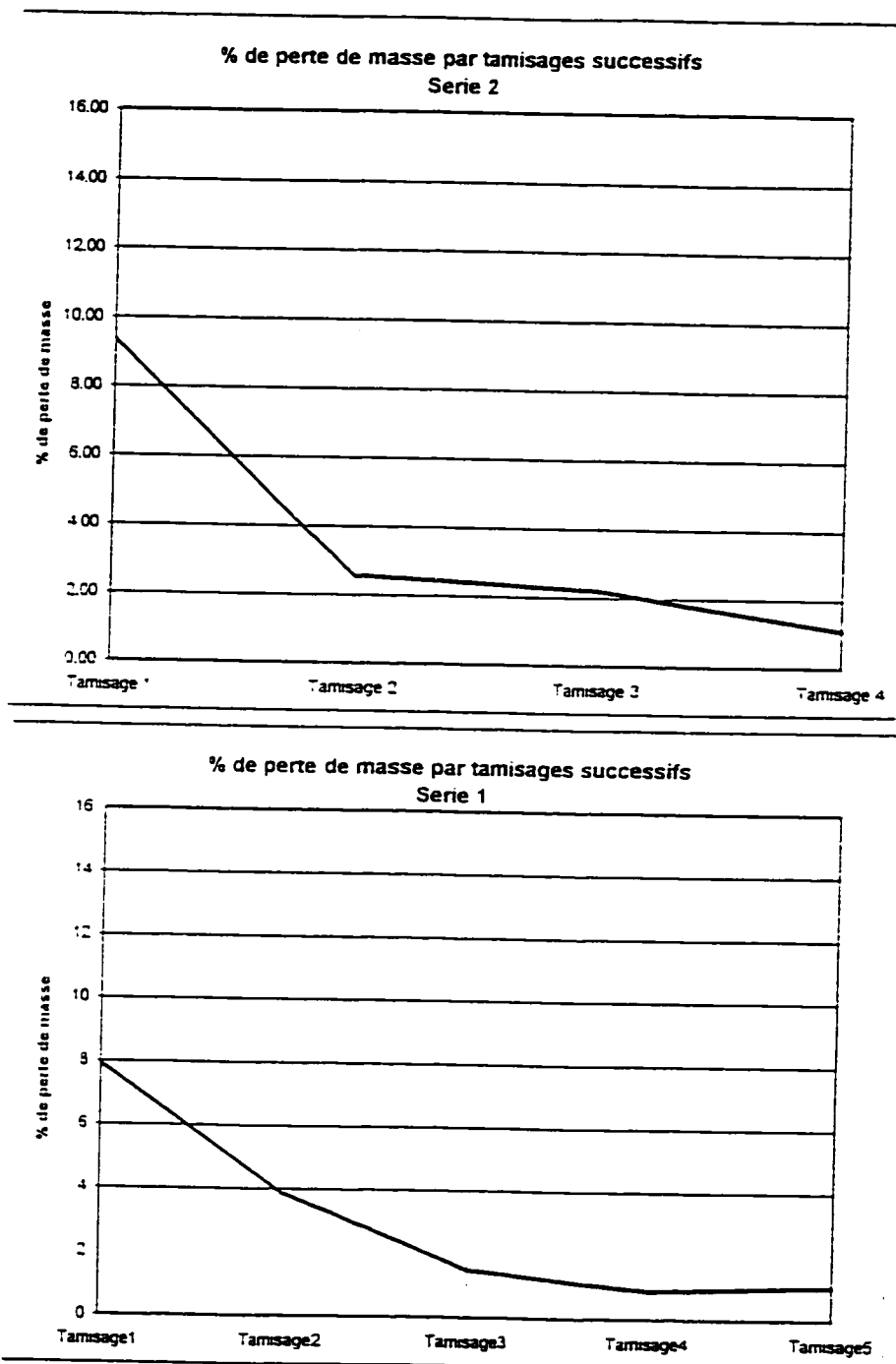


Figure D1 Evolution du pourcentage de perte de masse par tamisages successifs

L'étude de l'évolution des masses après chaque opération de tamisage permet d'identifier les fractions qui fournissent les fines. Les pertes de masses significatives sont indiquées en gras dans les tableaux. C'est dans la fraction 80-630 μm que ces pertes sont localisées (figure D2). La manipulation répétée de ce matériau permet d'affirmer qu'il s'agit d'agglutinations de fines qui se désagrègent.

L'ultime opération de lavage vient confirmer qu'il reste encore beaucoup de fines dans la moraine, et ce malgré plusieurs tamisages. Les pourcentages de fines récupérés par lavage sont de l'ordre de grandeur des pourcentages de fines produites par compactage.

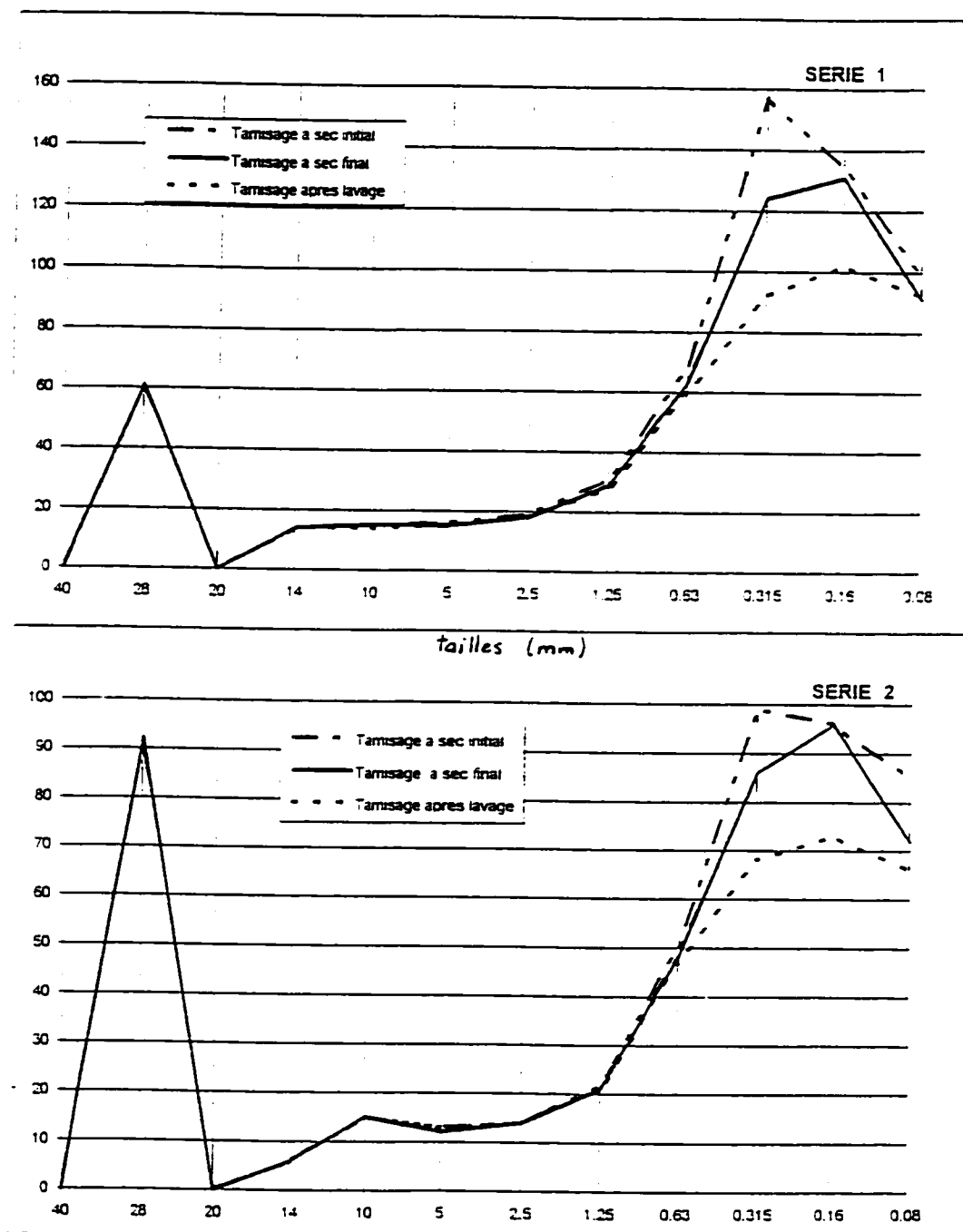


Figure D2 Evolution des pertes de masse par tamisages successifs (en grammes)

D.2.2.3 Conclusions

Pour établir l'efficacité des deux méthodes on a reporté à la figure D3 le pourcentage cumulé de fines récupérées en fonction des opérations effectuées. On se rend compte que le lavage associé à un tamisage à sec est plus efficace qu'une série de tamisage à sec. Le tamisage à sec seul permet de récupérer au mieux 9% des fines alors qu'avec le lavage on peut en récupérer près de 20% ou plus, selon les aptitudes de l'opérateur.

Les fines qui ne sont pas récupérées lors du tamisage à sec se retrouvent sous forme d'agglomérations pouvant atteindre 630 μm . On peut préconiser un broyage avant le tamisage, mais cette opération est rendue difficile par la présence de particules grossières. De plus le tamisage à sec ne pourrait enlever les fines collées aux particules grossières.

Pour un tamisage efficace ou coupure de la granulométrie à 80 μm , il faut procéder par lavage/tamisage pour avoir un résultat garanti.

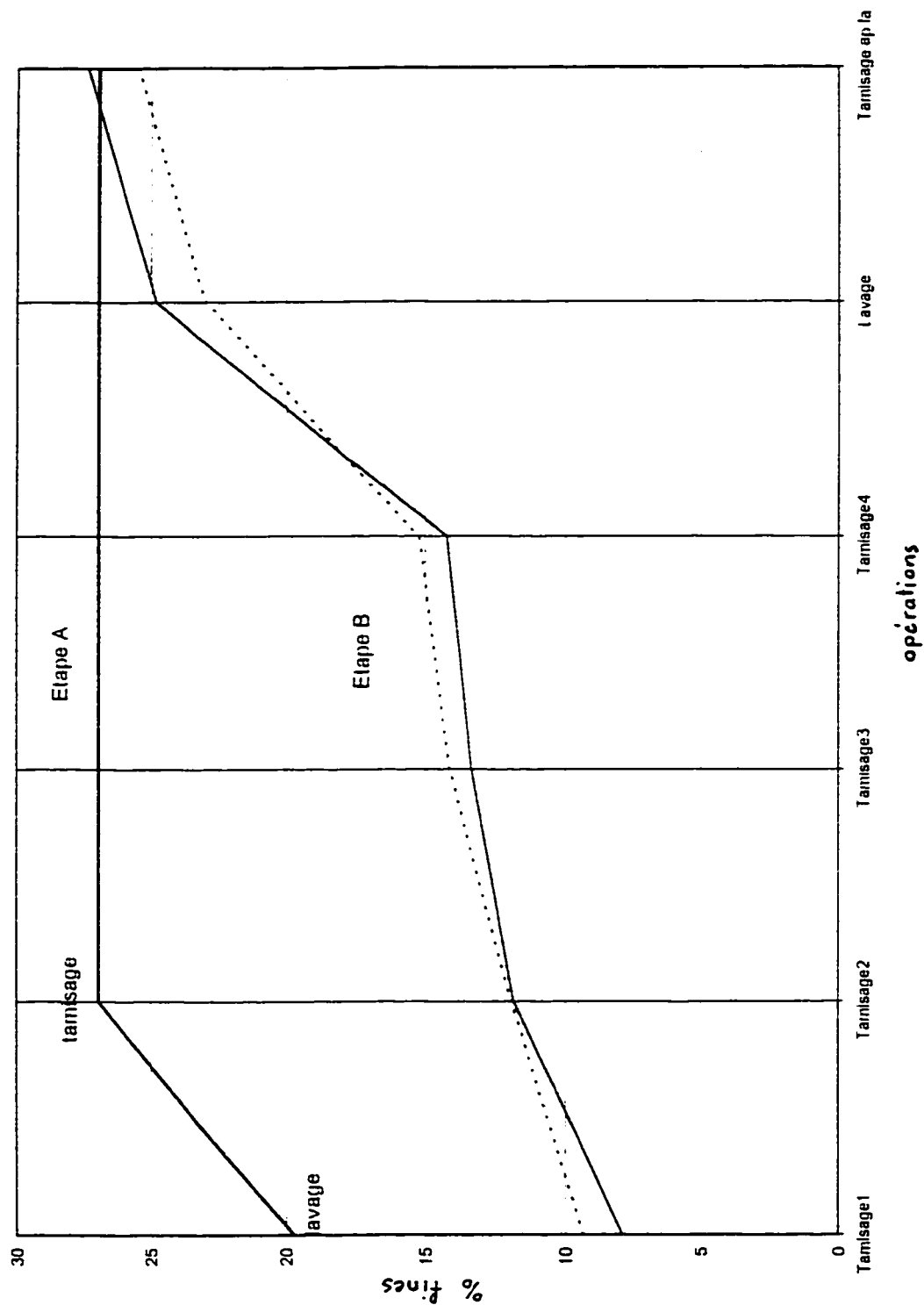


Figure D3 Comparaison des deux méthodes de tamisage

ANNEXE E

ETYMOLOGIE ET HISTOIRE DU MOT SUFFOSION

L'étude amorcée entre l'Hydro-Québec et l'Ecole Polytechnique, porte sur la migration de particules fines de sol à l'intérieur d'un squelette granulaire sous l'effet d'un écoulement d'eau. Ce phénomène sommairement décrit est appelé selon les différents auteurs, « suffusion » (Kovacs, 1981), « suffosion » (DVWK, 1986), « sufosion » (Lorincz, 1993), « suffosion » (Ziems, 1969). Comme le note Schuler (1995), l'incertitude qui entoure la définition du mot suffosion (ou autres orthographes) se traduit par la confusion qui règne sur son orthographe. Cette partie a pour but de clarifier la situation et ce en remontant jusqu'aux racines latines des termes.

Ces mots, qui signalons le existent tous, ont un sens et pas toujours celui que l'on croit. On montrera que certaines orthographes employées sont tout à fait incorrectes pour définir le problème qui nous occupe. L'étude étymologique qui est exposée ici a été réalisée en français, en anglais et en latin.

La lecture de récents dictionnaires français et anglais nous montre que seul le mot suffusion existe. Dans les deux cas la racine latine est la même ainsi que l'orthographe et la définition. Le mot est tiré du latin suffisio, de sub « sous » et fundere « verser ». Il s'agit de l'épanchement d'un fluide (sang ou liquide organique) à travers une partie du corps (tissus) dans laquelle il n'est pas habituellement contenu. Ce terme est fréquemment employé en médecine. Son synonyme le plus connu est épanchement. Il

est apparu en Angleterre en 1398 et sa définition médicale a été finalisée en 1859. En France, suffusion est apparu en 1363. En 1478 il s'écrivait suffision.

Le mot peut-être employé aussi pour définir la propagation en surface d'un liquide, d'une moisissure ou d'une couleur. L'emploi sous cette forme est apparue en 1611 et a été régulièrement utilisée jusqu'en 1852.

C'est en recherchant dans les encyclopédies françaises et anglaises des années soixantes qu'apparaissent les mots suffosion et suffossion qui depuis ont été délaissés. Ces deux mots ont la même racine latine : suffossio, onis qui signifie creusement, excavation, mine, sape fouille de sub « sous » et fossio, onis « action de creuser ». Côté anglais le terme est apparu en 1625 et l'on parle de suffossion de murs, c'est à dire de creusement sous les murs des châteaux et autres fortifications. La précision de la définition s'arrête là et il n'est nul question de migration de particules ou d'écoulement d'eau. Côté français, on nous reporte au terme inféroflux employé en hydrogéologie. Il s'agit d'un écoulement qui se produit sous une rivière, dans la masse des alluvions perméables. On appelle parfois cela sous-écoulement. On signale qu'un inféroflux prolonge l'écoulement superficiel et qu'il peut entraîner des matériaux fins (limons, argiles, sables fins) et provoquer de légers affaissements en surface du sol. Dans ce cas certains géomorphologues étrangers appellent ce phénomène suffosion.

On a donc une définition qui correspond au phénomène que l'on veut étudier, c'est à dire la migration de particules fines sous l'effet d'un écoulement d'eau dans un squelette granulaire.

Cette petite recherche permet donc de faire le point sur les termes que l'on rencontre fréquemment dans différentes publications. L'emploi du terme suffusion est incorrect. Il désigne, en anglais comme en français, un épanchement de liquide et il est employé de façon courante en médecine. Suffosion en français, et suffossion en anglais, ont la même base latine mais seule la définition française permet de le rattacher au sujet de ce mémoire. Par extension, on pourrait dire que l'emploi de ces deux mots est correct lorsque l'on veut parler de migration de particules fines à l'intérieur d'un squelette granulaire sous l'effet d'un écoulement d'eau.

On pourrait en rester là mais l'étymologie des mots nous en dit parfois plus long que les définitions qu'on leur a donné au fil des siècles. Une recherche plus poussée sur l'origine des différents termes cités plus haut nous montre que finalement aucun d'entre eux ne correspond réellement au phénomène qui nous occupe.

Suffusion comme on l'a vu est issu de fundere, fundo. Fundo: verser, répandre est un nom féminin. Tullius Cicero, né à Rome et plus connu sous le nom de Cicéron, (célèbre orateur, philosophe et médecin) fut le premier utilisateur du terme.

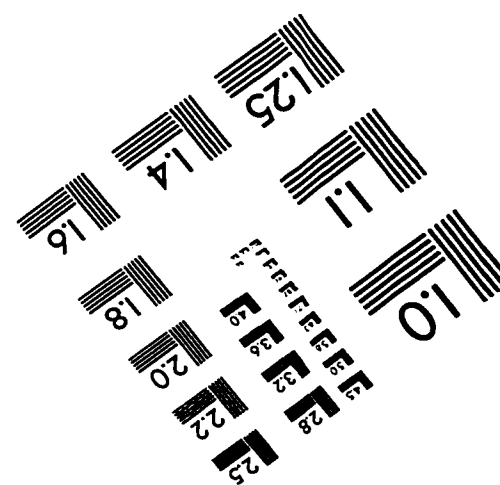
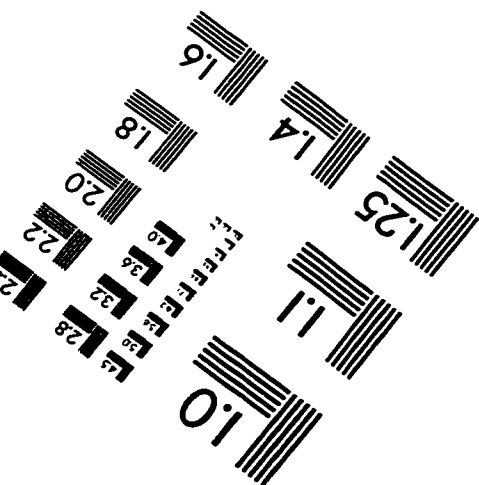
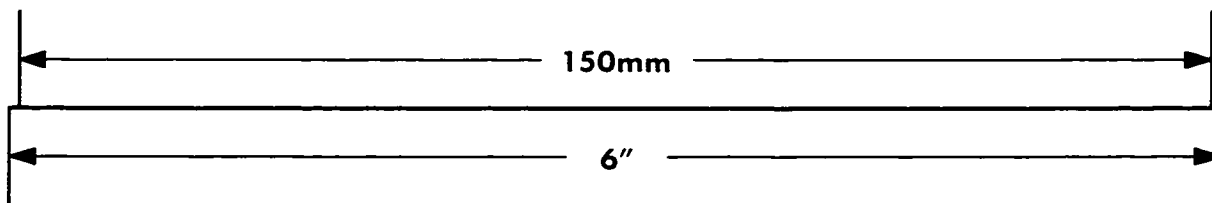
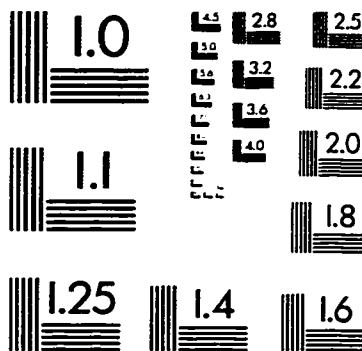
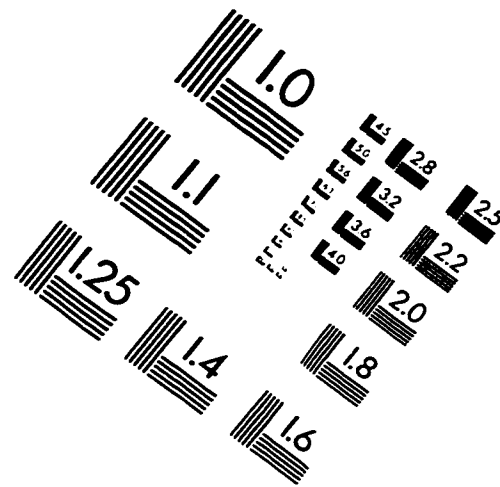
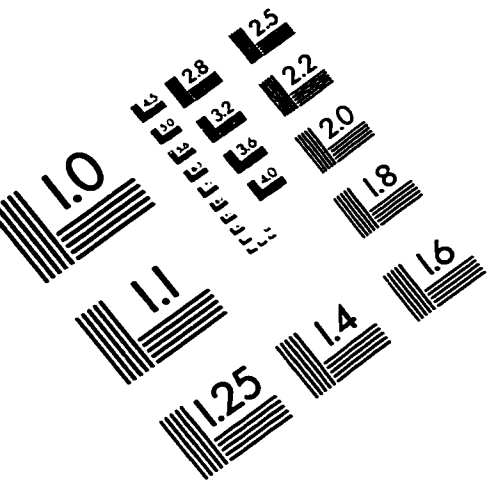
Suffosion est issu de fossio, onis « action de creuser ». L'origine de fossio est attribuée à Vitruvius Pollis (Vitruve) qui fut un célèbre architecte d'Auguste. Quant à suffossion il est traduit textuellement comme un creusement, une excavation, une fouille. Vitruvius l'employa aussi pour désigner les sapes et les mines qui avaient pour but de détériorer ou détruire les fortifications adverses. Mais cette suffosion était réalisée à main d'hommes, puisqu'il s'agit de creuser sous quelque chose.

Un terme toutefois se rapproche de notre définition. Il s'agit de subterluvio; attribué à Claudianus Mamertus - prêtre de Vienne en Gaule mort en 474 - ; il définit l'action de l'eau qui mine, qui sape.

Donc l'étude étymologique montre que suffosion ou suffossion ne décrivent pas le phénomène qui nous intéresse. Seul le terme subterluvio se rapproche de la définition citée plus haut.

En conclusion, nous pouvons affirmer que pour définir la migration de particules à l'intérieur d'un squelette granulaire sous l'effet d'un écoulement d'eau, l'emploi de suffusion n'est pas correct puisqu'il décrit un phénomène physique tout autre. Suffosion ou suffossion ont été utilisés depuis quelques années dans différents domaines (Hydrogéologie, géomorphologie) pour décrire cette migration de particules, mais le sens originel est tout autre. En fait, ils traduisent l'enlèvement de matière au sein d'une couche qui entraîne un affaissement en surface. Mais le seul mot qui décrit le travail de sape de l'eau est subterluvio. Il faudrait donc parler de subterluvion. Toutefois l'usage prolongé de suffosion dans différents domaines scientifiques fait aujourd'hui «jurisprudence». Il faudra donc employer suffosion en français et suffossion en anglais lorsqu'on parlera de migration de particules fines dans un squelette granulaire sous l'effet d'un écoulement.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc.
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved